



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH  
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

**BANCO EXPERIMENTAL DE ONDAS TORSIONALES  
GENERADAS BAJO EL PRINCIPIO DE MAGNETOSTRICCIÓN  
PARA LA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN ESTRUCTURAS  
CILÍNDRICAS**



**Memoria y Anexos**

<b>Autor:</b>	Josep Corrales Mascaró
<b>Director:</b>	Luis Eduardo Mujica Delgado
<b>Co-Director:</b>	Magda Ruiz Ordóñez
<b>Convocatoria:</b>	Junio 2018



## Resumen

Debido a las altas cargas que soportan las estructuras es probable que con el tiempo aparezcan grietas y, si no se controlan minuciosamente, se pueda llegar al colapso de la estructura. El colapso sin previo aviso puede suponer la muerte de personas y catástrofes naturales (si se trata del colapso de algún depósito con material altamente contaminante y perjudicial para la salud). Durante los últimos años han ocurrido algunos accidentes que podrían haberse evitado con un correcto control del estado de la estructura.

En este trabajo se ha realizado el diseño de un banco experimental para la detección de defectos en estructuras cilíndricas antes de que sean visibles. El principio de funcionamiento de este banco experimental consiste en la generación de ondas torsionales usando el principio de magnetostricción para recoger la información de la estructura estudiada. El actuador magnetostrictivo se excita con una señal deseada y genera sobre la estructura cilíndrica ondas torsionales que viajan a través de la misma. Mediante otro dispositivo magnetostrictivo (o piezoeléctrico/PZT's) ubicado al costado opuesto de la estructura, se transforma la onda recibida en señal eléctrica, actuando así como sensor. Esta señal es analizada y procesada para determinar si la estructura presenta alguna anomalía: desde tensiones indebidas, acoples incompletos, hasta defectos propiamente dichos. También se podría localizar y determinar su magnitud.

En el trabajo se explica cómo se debe diseñar el banco explicando cómo y dónde se ponen los sensores/actuadores en la estructura (tanto los magnetostrictivos como los PZTs), también la forma de integrarlos en la estructura (en este caso, la tubería). Además de la instalación de los elementos en la estructura también se explica el conexionado entre los equipos y los sensores/actuadores.

En relación a la adquisición de datos, se aprende a configurar la señal de excitación mediante Matlab y su introducción dentro del Software para su uso mediante el ordenador. Además se explica el funcionamiento y los parámetros de adquisición de datos para su uso al realizar los experimentos en búsqueda de defectos en estructuras.

Una vez realizada la experimentación se concluye que los sensores/actuadores magnetostrictivos son mejores que los piezoeléctricos y, en caso de estudios de estructuras de grandes dimensiones, los sensores/actuadores magnetostrictivos cumplen la función con satisfacción. Además se trata de unos elementos mucho más fáciles y rápidos de montar en la estructura que los PZT's ahorrando así tiempo de instalación.

## Resum

A causa de les altes càrregues que suporten les estructures és probable que amb el temps apareguin esquerdes i, si no es controlen minuciosament, es pugui arribar al col·lapse de l'estructura. El col·lapse sense previ avís pot suposar la mort de persones i catàstrofes naturals (si es tracta del col·lapse d'algun dipòsit amb material altament contaminant i perjudicial per a la salut). Durant els últims anys han ocorregut alguns accidents que podrien haver-se evitat amb un correcte control de l'estat de l'estructura.

En aquest treball s'ha realitzat el disseny d'un banc experimental per a la detecció de defectes en estructures cilíndriques abans que siguin visibles. El principi de funcionament d'aquest banc experimental consisteix en la generació d'ones torsionals usant el principi de magnetostricció per recollir la informació de l'estructura estudiada. L'actuador magnetostrictiu s'excita amb un senyal desitjada i genera sobre l'estructura ones cilíndrica torsionals que viatgen a través de la mateixa. Mitjançant un altre dispositiu magnetostrictiu situat al costat oposat de l'estructura, es transforma l'ona rebuda en senyal elèctric, actuant així com a sensor. Aquest senyal s'analitza i processa per determinar si l'estructura presenta alguna anomalia: des tensions indegudes, acoblaments incomplets, fins defectes pròpiament dits. També es podria localitzar i determinar la seva magnitud.

En el treball s'explica com s'ha de dissenyar el banc explicant com i on es posen els sensors/actuadors en l'estructura (tant els magnetostrictius com els PZTs) així com integrar-los en l'estructura (en aquest cas, la canonada). A més de la instal·lació dels elements en l'estructura també s'explica la connexió entre els equips i els sensors/actuadors.

En relació a l'adquisició de dades, s'aprèn a configurar el senyal d'excitació mitjançant Matlab i la seva introducció dins el Programari per al seu ús mitjançant l'ordinador. A més, s'explica el funcionament i els paràmetres d'adquisició de dades per al seu ús en realitzar els experiments en recerca de defectes en estructures.

Un cop realitzada l'experimentació es conclou que els sensors/actuadors magnetostrictius són millors que els piezoelèctrics i, en cas d'estudis d'estructures de grans dimensions, els sensors/actuadors magnetostrictius compleixen la seva funció satisfactòriament. A més es tracta d'uns elements molt més fàcils i ràpids de muntar en l'estructura que els PZT's estalviant així temps d'instal·lació.



## Abstract

Due to the high loads that the structures support, cracks could appear over time and, if they are not carefully controlled, the structure will collapse. The collapse without prior notice can lead to the death of people and natural disasters (in the case, for example, of a deposit with highly polluting material that is harmful to health). During the last years, there have been some accidents that could have been avoided with a correct monitoring of the structure state.

In this work, an experimental bench has been designed to detect defects in cylindrical structures before they are visible. The operating principle of this experimental bench consists in the generation of torsional waves using the magnetostriction principle to collect the information of the structure studied. The magnetostrictive actuator is excited with a desired signal and generates on the structure torsional cylindrical waves that travel through it. By means of another magnetostrictive device located on the opposite side of the structure, the received wave is transformed into an electrical signal, thus acting as a sensor. This signal is analysed and processed to determine if the structure presents any anomaly: from undue stresses, incomplete couplings, to actual defects. One could also locate and determine its magnitude.

This work defines how the bank should be designed explaining how and where the sensors/actuators are located in the structure (both the mangetostrictive and the PZTs) and how to integrate them into the structure (in this case, the pipeline). In addition to the installation of the elements in the structure, the connection between the equipment and the sensors/actuators is also explained.

In relation to the acquisition of data, we learn to configure the excitation signal through Matlab and its introduction into the Software for use by the computer. In addition, the operation and data acquisition parameters are explained for use when performing the experiments in search of defects in structures.

Once the experimentation is done, it is concluded that magnetostrictive sensors/actuators are better than piezoelectric sensors and, in the case of studies of large structures, the magnetostrictive sensors/actuators keep satisfactorily their function. In addition, these are much easier and quicker elements to assemble in the structure than the PZTs, therefore the installation time is lesser.



## Agradecimientos

Quiero agradecer el trabajo realizado por el profesor Luis Eduardo Mujica por ayudarme en todo lo que ha podido, sacar tiempo para reunirme y, sobretodo, por todo lo que me ha enseñado durante la elaboración de éste trabajo. También agradecer a Jabid Eduardo Quiroga Méndez que, con su amplio conocimiento sobre el proceso de la magnetostricción, me ha dado muy buenos consejos y recomendaciones que, sin ellas, me habría costado mucho más llevar a cabo éste proyecto. Agradecer también a la profesora Magda Ruiz su gran implicación en la fase final del proyecto para ayudarme a pulir todos los detalles y en la redacción de la memoria. Agradecer al profesor Leonardo Acho su interés en el banco experimental y su ayuda para la realización del montaje y experimentación.





# Índice

<b>RESUMEN</b>	<b>I</b>
<b>RESUM</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	<b>V</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
1.1. Motivación .....	12
1.2. Objetivos .....	13
<b>2. PRINCIPIO DE MAGNETOSTRICCIÓN</b>	<b>14</b>
2.1. Definición .....	14
2.2. Aplicaciones de la magnetostricción .....	17
2.3. Coeficiente de magnetostricción .....	18
2.4. Materiales magnetostrictivos .....	18
2.5. Tipos de ondas guiadas .....	20
<b>3. BANCO DE EXPERIMENTACIÓN</b>	<b>22</b>
3.1. Equipamiento del laboratorio .....	22
3.1.1. Sistema de generación de señales y adquisición de datos .....	22
3.1.2. Ordenador .....	42
3.1.3. Amplificador de voltaje .....	43
3.1.4. Amplificador de corriente .....	44
3.1.5. Soldador .....	45
3.1.6. Sensores piezoeléctricos .....	45
3.1.7. Material magnetostrictivo para generación .....	47
3.2. Montaje de la estructura a analizar .....	49
3.2.1. Estructura utilizada .....	49
3.2.2. Construcción del actuador magnetostrictivo .....	50
3.2.3. Conexión y pegado de los piezoeléctricos .....	56
3.2.4. Conexiónado general .....	64
3.3. Generación de la señal de excitación .....	65
3.4. Obtención de datos .....	67
<b>4. EXPERIMENTACIÓN</b>	<b>68</b>

4.1. Experimentación realizada .....	68
4.2. Ejemplo de señales capturadas .....	70
4.2.1. Señales capturadas usando como actuador M1 .....	72
4.2.2. Señales capturadas usando como actuador M2 .....	74
4.3. Resultados.....	77
<b>5. ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL .....</b>	<b>79</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>80</b>
<b>PRESUPUESTO Y/O ANÁLISIS ECONÓMICA.....</b>	<b>81</b>
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>85</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>86</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>91</b>

## 1. Introducción

Se puede definir un defecto o daño en una estructura como el cambio en el material y en sus propiedades que afectan negativamente el desempeño actual y futuro de la misma. Tener la capacidad de detectarlos cuando se encuentran en su estado inicial es un reto en la ingeniería (civil, mecánica, aeronáutica, aeroespacial, entre otras). La monitorización y detección de daños en estructuras conocida por su sigla en inglés como SHM (Structural Health Monitoring, o SHM), consiste en diseñar sistemas incorporados en la estructura que registran continuamente la actividad mecánica [2]. Estos sistemas deben detectar la aparición de daños o fuerzas externas que sean un riesgo y así garantizar la integridad/seguridad en la estructura (Figura 1.1). Como consecuencia directa, los costes de mantenimiento y reparación se reducen porque se eliminan las inspecciones y sustituciones innecesarias. Normalmente los daños no son de visualización directa y, por tanto, se necesita un método eficaz y rápido para su detección y localización de forma sencilla y económica para hacer viable el procedimiento anteriormente descrito.

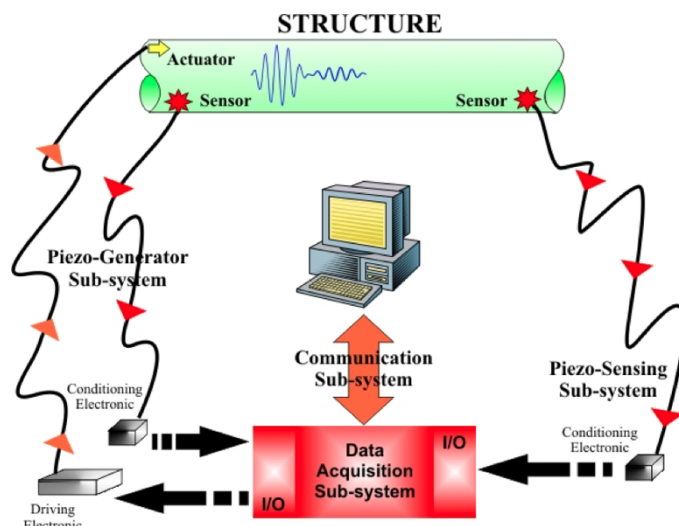
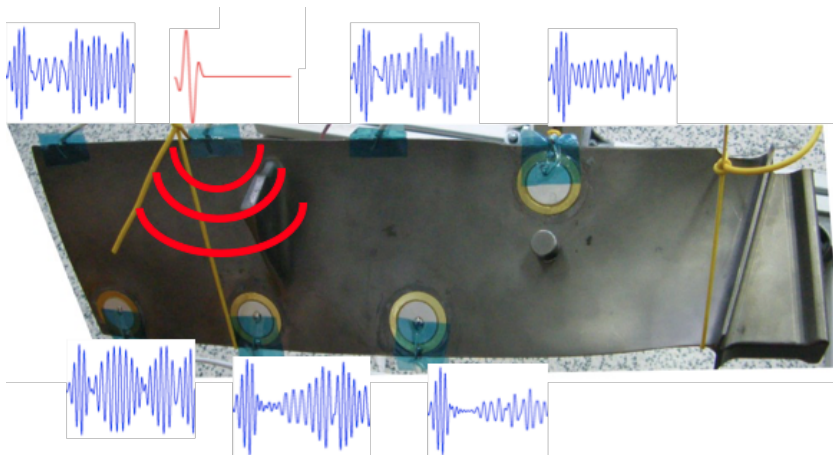


Figura 1.1. Sistema para detección de defectos basándose en vibraciones [4].

Actualmente ya existen técnicas no destructivas para realizar la detección de éstos defectos. Esta técnica se basa en que los sensores y actuadores del sistema están integrados de forma permanente en la estructura, recogiendo datos de forma continua durante la vida de servicio de la estructura, sin intervención del operador. El problema de éstas técnicas es que son necesarios muchos sensores. Por tanto, al necesitar de tantos sensores es necesario, a su vez, mucho tiempo, recursos y mantenimiento para su instalación y puesta en marcha. Después se debe realizar el diagnóstico procesando toda la información almacenada por los sensores. Existen diferentes técnicas utilizadas para el sensado de las estructuras que son útiles en la detección de los cambios estructurales. Estas

técnicas están basadas en vibraciones, ondas guiadas, fibra óptica, emisión acústica, diferencia de presiones y campos electromagnéticos. Actualmente se utilizan piezoeléctricos (PZT's). Los PZT's son un transductor que utiliza el efecto piezoeléctrico para medir diferentes tipos de señales. Estas pueden ser de presión, aceleración, temperatura, tensión, fuerzas y muchas más. Donde el fenómeno piezoeléctrico es el fenómeno físico que presentan algunos materiales/cristales cuando al comprimir el cristal por deformación mecánica, los átomos cargados del material/cristal se desplazan, de esta forma se suman las cargas y esta es la diferencia de potencial (voltaje). De forma inversa, cuando el transductor se excita por medio de un generador eléctrico, los átomos se desplazan por fuerza electrostática creando la deformación mecánica. Los PZT's se distribuyen a lo largo de la estructura. A uno de ellos se le aplica una señal de excitación, al cual se llama actuador. La onda se propaga y transmite por la estructura y se capta por los sensores restantes (ver Figura 1.2).



**Figura 1.2.** Técnica de sensado para estructuras utilizando piezoeléctricos [5].

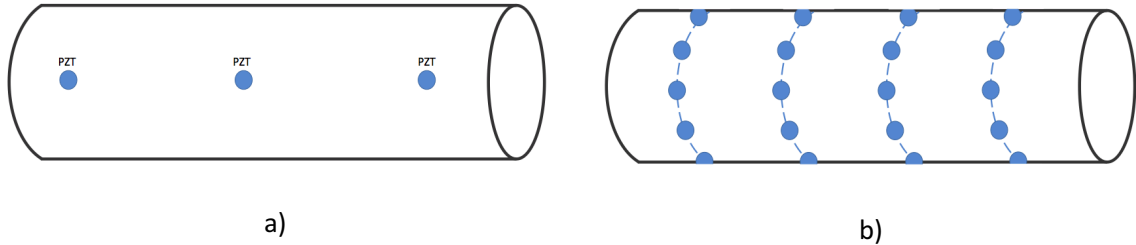
La forma de propagación de la onda dependerá de la forma como el actuador trabaje. En este caso, los PZT's pueden trabajar con tres tipos de ondas que se propagan de diferente forma por la estructura: (Una explicación más a fondo de estas ondas se encuentra en el capítulo 2.5 de éste trabajo)

- Transversales: Cuando el movimiento del actuador es perpendicular a la dirección de propagación, en este caso la superficie de la tubería.
- Longitudinales: Cuando el movimiento del actuador es paralelo a la dirección de propagación, en este caso la superficie de la tubería.
- Torsionales: Torsionales: Cuando el actuador aplica un momento de fuerza sobre un eje longitudinal y la onda resultante se tuerce en sentido helicoidal (es decir en forma de hélice).

Para la monitorización, los PZT's que operen con las ondas longitudinales y transversales se localizan tal como se indica en la Figura 1.3a, que es una configuración sencilla y viable. Sin embargo, cuando se desea operar con ondas torsionales, la localización de los PZT's es mucho más compleja porque es



imprescindible formar una configuración en anillo alrededor de la estructura cilíndrica. Lo cual, aumenta en gran medida la cantidad necesaria de PZT's. Adicionalmente, estos anillos no pueden estar muy distanciados entre si y deben ser sincronizados (Figura 1.3b).



**Figura 1.3** Configuración para la monitorización en estructuras cilíndricas utilizando PZT's. a) PZT's operando con ondas longitudinales y transversales. b) PZT's operando con ondas torsionales

En cuanto a la estructura, si esta presenta un daño/defecto/deformación, la onda se altera y será por tanto, diferente a la recibida cuando no existe un daño. En vista de la necesidad de monitorizar estructuras como las tuberías, los piezoeléctricos presentan varios inconvenientes:

- El piezoeléctrico como actuador genera un movimiento/vibración. Este se transmite por la estructura en forma de onda guiada, específicamente ondas transversales y longitudinales. Estas, a su vez, van rebotando y se van sumando entre sí, por tanto, la onda captada por los piezoeléctricos operados como sensores no es completamente la señal que se ha emitido.
- La velocidad de la onda transmitida varía de acuerdo a la frecuencia de la excitación.
- Necesitan que el actuador tenga una capacidad de vibración potente para poder ser transmitida la señal a lo largo de la estructura.
- Captan interferencias ajenas a la onda de excitación
- Alta sensibilidad a la temperatura.
- Configuración para la monitorización en estructuras cilíndricas compleja y no viable para operar con ondas torsionales

En el caso de las estructuras cilíndricas, como las tuberías, el problema de transmisión de la señal se incrementa por la misma forma geométrica de ellas. Por eso es importante estudiar y diseñar un nuevo sistema de interrogación (excitación y sensado) que utilice otro tipo de ondas como la onda torsional. Las principales ventajas de este tipo de ondas son las siguientes:

- No les afecta el líquido que fluye por la tubería (no hay disipación por el líquido).
- En las ondas torsionales, la velocidad de viaje de las ondas es la misma e independiente a la frecuencia de excitación.
- Trabajan muy bien con variaciones de temperatura.

## 1.1. Motivación

Actualmente en el laboratorio de CoDAlab se están realizando diferentes experimentos con la finalidad de detectar defectos estructurales. Con la experiencia, se ha mejorado el procedimiento de captación de datos y detección de los fallos. Para hacerlo, se han estado utilizando transductores piezoeléctricos para generar y capturar las ondas guiadas en la estructura. Actualmente los piezoeléctricos se quedan cortos ya que no pueden usarse en estructuras muy grandes y cilíndricas. Es por ese motivo que se desea mejorar el sistema de monitorización y detección de daños, aumentando la capacidad de transmisión de las ondas a través de la estructura. También se desea disminuir la cantidad de sensores instalados a lo largo de la estructura.

De esta forma, éste trabajo final de grado se centra en diseñar un nuevo banco para realizar experimentos en estructuras utilizando otros tipos de sensores. Así se espera minimizar el número de elementos necesarios para el desarrollo de los experimentos.

Para lograrlo, se utilizarán transductores magnetostrictivos. Estos dispositivos se basan en el principio de magnetostricción para generar ondas guiadas en la estructura. Al existir un campo magnético, se produce un cambio en la forma mecánica de los materiales magnéticos. Si este campo magnético es variable en el tiempo, la variación de la forma mecánica del material puede usarse para generar vibraciones mecánicas (ondas guiadas) en la estructura a estudiar.

En el banco para el desarrollo de experimentos, estos sensores emitirán y recibirán ondas ultrasónicas, el cual se puede clasificar como un test no destructivo para las estructuras cilíndricas como las tuberías. Otra ventaja que aporta el material magnetostrictivo respecto a los piezoeléctricos es que este sistema es mucho más robusto y fiable frente a los cambios de temperatura.

## **1.2. Objetivos**

El objetivo del trabajo final de grado es el diseño de un banco experimental para la detección de defectos en estructuras cilíndricas utilizando ondas torsionales. Estas ondas se generarán mediante el principio de magnetostricción para detectar defectos estructurales no visibles en estructuras cilíndricas como pueden ser tuberías. Gracias a la construcción de este banco experimental, el grupo de investigación CoDALab incrementará el alcance de su metodología para la monitorización de estructuras con diferentes formas geométricas: planas, circulares y con rigidizadores (como por ejemplo el álabes de un avión (ver figura 1.2)) con la posibilidad de mejorar el proceso de detección, localización y clasificación de defectos (al conocer, por ejemplo, donde se producen daños como las grietas).

Dentro del esquema general de un sistema para la monitorización y detección de defectos, el primer bloque corresponde al sistema de interrogación, es decir, definición de la tecnología que se utilizará para excitar y conocer la respuesta de la estructura a dicha excitación. Este nuevo banco experimental se integrará al sistema que el grupo CoDALab tiene en marcha y ha invertido mucho tiempo en investigación. De esta forma, este trabajo contribuirá en el proceso de adquisición de datos para después proceder a su análisis y comprensión. El equipo que se utilizará para la adquisición de datos es el Software del PicoScope que controla un osciloscopio que está conectado al ordenador. De manera inherente se desarrollarán habilidades con el funcionamiento de los equipos de laboratorio usados para la realización del banco experimental como son los amplificadores de voltaje y corriente, el sistema de generación de señales y el material magnetostrictivo junto a los PZT's (piezoeléctricos formados por zirconato titanato de plomo). Además se conocerán y estudiarán los principios de funcionamiento de los transductores piezoeléctricos y magnetostrictivos, así como el principio de generación de ondas guiadas. Una vez se conozcan los equipos y los principios de funcionamiento de las ondas guiadas en todos los elementos que se deben usar, se procederá al montaje del banco experimental y a probarlo con la experimentación sencilla utilizando una tubería.

El aporte de este banco experimental será el de mejorar la fiabilidad de la señal adquirida por los sensores. Esta señal será pre-procesada y utilizada para la detección de defectos en estructuras cilíndricas para así poder evitar posibles accidentes que hasta ahora no pueden predecirse de forma precisa ni rápida.

Como apunte personal, deseo mostrar al lector de una forma fácil y entendible el funcionamiento de todos los elementos necesarios para la realización del banco experimental y su posterior montaje y puesta en marcha para empezar la obtención de datos.

## 2. Principio de Magnetostricción

### 2.1. Definición

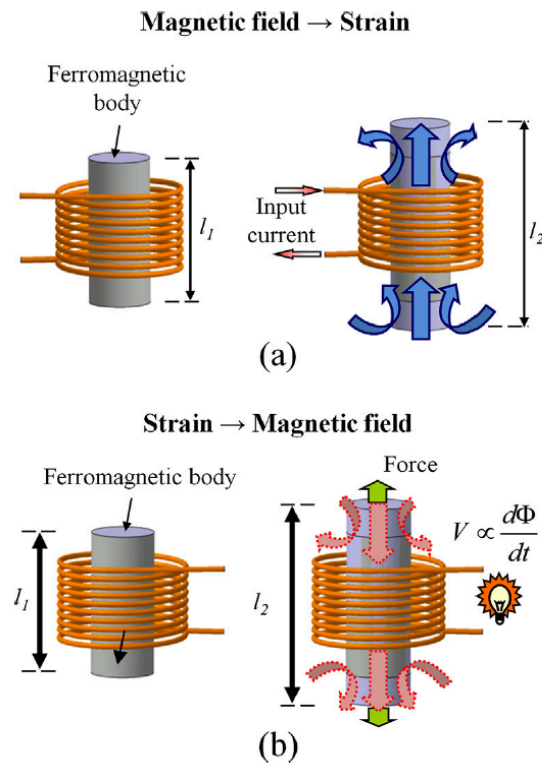
La magnetostricción es un fenómeno de acoplamiento que implica un proceso de magnetización y de cambio de dimensión en materiales ferromagnéticos como el hierro, níquel, cobalto, aluminio, entre otros. Cuando estos materiales están sujetos a un campo magnético externo, presentan un cambio de longitud (tamaño) que se le llama “efecto Joule” (ver Figura 2.1a). Si por el contrario, existe algún cambio en la longitud (tamaño), el material inducirá un campo magnético que se le llama “efecto Villari” (ver Figura 2.1b). Ahora bien, cuando un material ferromagnético está sujeto a un campo magnético estático en una dirección y al mismo tiempo a un campo dinámico de dirección ortogonal a la dirección del campo estático, se presenta el “Efecto Wiedemann” una deformación por cizallamiento está desarrollado en el material [1]. En palabras generales, se puede definir la magnetostricción como una propiedad de los materiales ferromagnéticos que causa un cambio de forma y dimensión del material. Este cambio de dimensión se produce durante un proceso de magnetización del material que produce la expansión o contracción del mismo. A medida que se aumenta la magnetización aplicada al material, la fuerza magnetostrictiva aumenta. Por tanto, la variación de la magnetización del material debido al campo magnético aplicado cambia la tensión magnetostrictiva hasta alcanzar el valor de saturación del material en estudio donde éste ya no puede modificar más su dimensión [1].

Un transductor (elemento que se adhiere a la estructura para que trabaje como actuador y/o sensor) de parche magnetostrictivo (MPT) es un transductor que explota los fenómenos magnetostrictivos representando interacciones entre campos mecánicos y magnéticos en materiales ferromagnéticos. En los últimos años las investigaciones en sensores se han enfocado en este tipo de tecnología MPT. La tecnología MPT se desarrolló para aplicarse principalmente en pruebas ultrasónicas no destructivas de ondas guiadas en estructuras como por ejemplo los tubos y placas.

El MPT consiste en un circuito magnético compuesto por imanes permanentes y bobinas, y un parche magnetostrictivo delgado que funciona como un elemento de detección y actuación que está unido o acoplado con una prueba guía de onda. Las configuraciones del circuito y el parche magnetostrictivo por lo tanto afectan críticamente al rendimiento de un MPT, así como los modos de onda excitados y medidos en una onda guiada. En este trabajo, una variedad de configuraciones de MPT de última generación y sus aplicaciones serán revisadas junto con el principio de funcionamiento de este transductor.

Para entender cómo se produce el efecto de la magnetostricción en los materiales ferromagnéticos debido a campos magnéticos es necesario conocer la estructura interna de los materiales. En el caso de los ferromagnéticos, tienen una estructura interna que se divide en dominios. Cada dominio es una región con una polarización magnética uniforme. Cuando un campo magnético se aplica al material, las fronteras entre los dominios rotan y cambian su posición para alinearse con el campo magnético exterior. Debido a esta colocación uniforme de los diferentes dominios que componen el material, éste modifica su dimensión ya que todo el material está alineado [13]. Este cambio de tamaño debido a la organización de dominio es debido a la anisotropía magnetocristalina, que necesita más energía para magnetizar el material en una dirección que en otra. Normalmente las direcciones donde es más fácil magnetizar el material coinciden con los ejes principales de la estructura cristalina del material. Si se aplica un campo magnético que favorezca al eje principal de la estructura cristalina, el material reorganizará su estructura interna para alinearla con el eje principal donde se aplica el campo magnético para minimizar la energía libre del sistema. Si el campo magnético no se aplica en un eje principal y, dado que el material tiene diferentes direcciones asociadas a diferentes longitudes, se induce una tensión en el material [19]. A este proceso se lo conoce como efecto Joule.

El material magnetostrictivo puede tener un efecto contrario al explicado en el párrafo anterior. Cuando el material está sujeto a un cambio mecánico mediante la aplicación de una tensión exterior, éste puede cambiar su magnetización al modificar la dirección y longitud de los dominios que componen su estructura interna. A este proceso se lo conoce como efecto Villari. Para entender mejor el efecto Joule y el efecto Villari se puede visualizar en la siguiente imagen una descripción esquemática de ambos efectos:



**Figura 2.1.** Descripción esquemática del efecto Joule (a) y del efecto Villari (b) [1].

Según lo explicado anteriormente, se puede comprobar que el material es bidireccional. Se dice que se trata de un material bidireccional porque mediante la aplicación de un campo magnético exterior puede modificar su tamaño y, si se le aplica una tensión exterior, puede modificar su magnetización interna mediante la reorganización de las microestructuras.

Comparado con otros populares transductores utilizados para NDT, como los transductores piezoeléctricos, los transductores magnetostrictivos tienen las siguientes ventajas: buena sensibilidad y durabilidad, ausencia de cableado directo a un transductor o muestra de prueba, inspección de largo alcance, fácil implementación y buena relación costo-efectividad. Desde la operación de un magnetostrictivo transductor implica un campo magnético para la generación y detección de ondas mecánicas en una muestra de prueba, a menudo se percibe como un tipo de transductor acústico electromagnético (EMAT).

## **2.2. Aplicaciones de la magnetostricción**

El fenómeno magnetostrictivo es representado mediante interacciones entre campos mecánicos y magnéticos en materiales ferromagnéticos. Como ya sabemos se trata de un material bidireccional, el cual puede actuar de dos formas distintas.

Este tipo de material puede actuar como actuador en un banco experimental. Para usarlo como actuador hay que aprovechar sus propiedades de cambio de tamaño. Al enviarle un pulso externo mediante una señal realizada con ordenador, el material magnetostrictivo responde generando una onda que se transmite por toda la estructura donde esté alojado. Con esta aplicación, se puede usar el material en cualquier estructura ferromagnética como actuador, ya que lo podemos montar del tamaño que queramos y enviarle el pulso adecuado según la estructura estudiada.

Otra aplicación del material es su uso de forma contraria al explicado anteriormente. Cuando el material recibe una onda guiada, éste responde proporcionalmente a la onda recibida. Con este procedimiento el material actúa como sensor ya que nos da la información de lo que se recibe de la estructura estudiada. Al tratarse del mismo material que el párrafo anterior, tiene las mismas ventajas, siendo muy flexible en su instalación en cualquier estructura.

Como se puede observar estudiando sus aplicaciones, se trata de un material que puede actuar como actuador y como sensor y, por tanto, aporta grandes ventajas en relación a la detección de defectos al solo necesitar un único elemento. Se planea la utilización de un solo elemento que se use de actuador y, una vez enviado la onda a través de la estructura, utilizar el mismo elemento como sensor en el momento en que la onda enviada rebote y se transmita en el que antes había sido el actuador. Gracias a esta funcionalidad, con solo la instalación de un elemento magnetostrictivo en la estructura ya se podría estudiar toda la superficie en búsqueda de defectos que al ojo humano no se pueden percibir.

## 2.3. Coeficiente de magnetostricción

Para encontrar los mejores materiales para su utilización como materiales magnetostrictivos se debe tener en cuenta el coeficiente magnetostrictivo ( $\lambda$ ). Este coeficiente es la relación entre el cambio fraccional en longitud (cambio de longitud dividido por la longitud original) y la magnetización del material. Entre magnetización de 0 A/m hasta el valor de saturación del material en estudio la relación entre el cambio de longitud y de magnetización es lineal. El coeficiente de magnetostricción es solo aplicable de 0 A/m al valor de saturación del material y sus unidades son  $\left(\frac{m/m}{A/m}\right)$ .

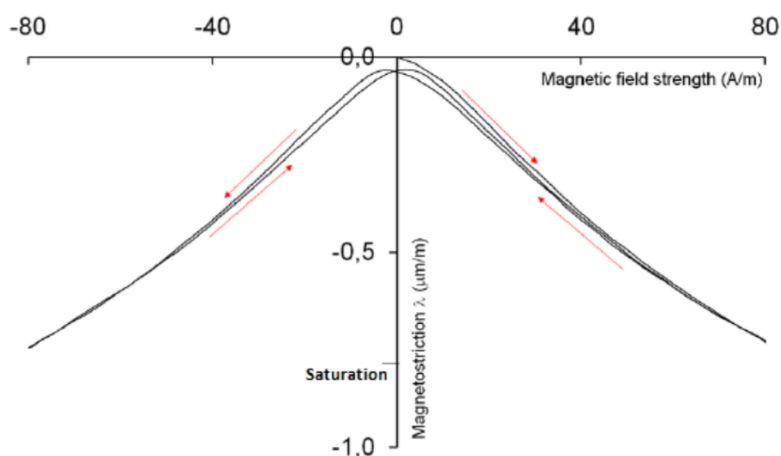


Figura 2.2. Curva de histéresis para la magnetización [10].

En la figura 2.2 se representa la curva de histéresis de un material bueno para ser usado para realizar el principio de magnetostricción. Como se puede observar, se tiene un crecimiento casi lineal de 0 A/m hasta el valor de saturación del material tanto del lado positivo como del negativo. Cuando mayor es la saturación, mayor es la magnetización aplicada hasta llegar al estado de saturación donde la magnetización ya no aumenta.

## 2.4. Materiales magnetostrictivos

Los materiales más efectivos para la magnetostricción son los isótropos que tienen algunas impurezas ya que son los que más dominios presentan en su estructura cristalina. Además estas propiedades permiten a las moléculas bipolares rotar modificando fácilmente el tamaño del material y su estado de magnetización.

Todos los materiales tienen un valor de saturación, el cual depende de cada material en concreto pero se caracteriza por el punto en que todos los dominios del material están alineados con el campo magnético externo y, por tanto, el material ya no puede modificar más su tamaño. También hay que



tener en cuenta que cuando se deja de magnetizar el material, éste no vuelve a su posición inicial, ya que el material contiene magnetización remanente dando resultados diferentes a cero.

Para encontrar los mejores materiales para su utilización como materiales magnetostrictivos se debe tener en cuenta el coeficiente magnetostrictivo ( $\lambda$ ) ya que a mayor coeficiente magnetostrictivo, mejor es el material frente al proceso de la magnetostricción [7]. Los materiales más utilizados se seleccionan según su deformación máxima y, sobretodo, según el coeficiente magnetostrictivo. A continuación se pueden ver dos tablas donde se enseñan los principales materiales utilizados para la magnetostricción:

Material	Inducción de saturación (T)	Deformación máxima ( $m \times 10^{-6}$ )
Fe	2,15	-14
Ni	0,61	-50
Co	1,79	-93
50% Co – 50% Fe	2,45	87
50% Ni – 50% Fe	1,60	19
TbFe <sub>2</sub> (Terfenol)	2,5	2630
Terfenol-D	1,0	1620

**Tabla 1.** Deformación máxima e inducción de saturación de diferentes materiales [8].

Material	Coeficiente de magnetostricción ( $\lambda$ ) ( $10^{-7}$ )	
	$\lambda_{100}$	$\lambda_{111}$
Fe	19,5	-18,8
Ni	-45,9	-24,3
Tb <sub>x</sub> Dy <sub>1-x</sub> Fe <sub>2</sub> (Terfenol-	90	1640

**Tabla 2.** Coeficiente de magnetostricción de los materiales magnetostrictivos más utilizados [9].

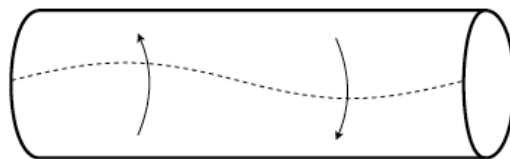
Como se puede comprobar, el material con mejor coeficiente de magnetostricción que se conoce es el Terfenol-D ( $TbxDy_{1-x}Fe_2$ ). Como se observa en su fórmula química, se trata de una aleación de terbio (Tb), disprosio (Dy) y hierro (Fe). Su nombre proviene de los materiales que lo componen y del laboratorio que lo desarrolló Naval Ordnance Laboratory (NOL), ya que este material no existe en la naturaleza. Este material es capaz de generar tensiones 100 veces mejores que los materiales magnetostrictivos tradicionales y entre 2 y 5 veces mejor que los PTZ's tradicionales.

## 2.5. Tipos de ondas guiadas

Una onda es una perturbación que se propaga de un lugar a otro a través de un medio elástico. Al propagarse la onda, el medio elástico se deforma y se recupera vibrando al paso de la onda. La perturbación agita la primera partícula del medio en el que impacta y a partir de ahí se inicia la reacción en cadena formando la onda a través del medio.

En magnetostricción se pueden generar diferentes tipos de ondas según el tipo de estructura que se quiera estudiar y según los sensores y actuadores que se utilicen. Los tipos de ondas que se pueden usar son las torsionales, las longitudinales y las transversales. A continuación se van a explicar detalladamente los diferentes tipos de ondas que pueden usarse:

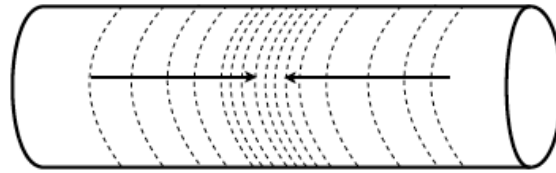
- Ondas torsionales: Se trata de un tipo de onda que se desplaza de forma torsional por todo el medio (ver figura 2.3). Las ondas torsionales no solo sirven para detectar las variaciones generales en el área transversal completa de la tubería, sino también cambios que se han producido en el material por causa de diferentes defectos en la estructura en estudio. Su mayor ventaja en la detección está en las estructuras cilíndricas ya que este tipo de onda es capaz de estudiar toda la superficie al desplazarse en forma de hélice, la cual cosa no pueden hacer las ondas longitudinales ni transversales.



**Figura 2.3.** Representación onda torsional.

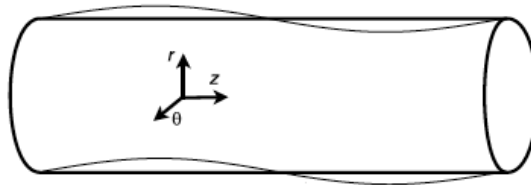
- Ondas longitudinales: Se trata de un tipo de onda en el cual el desplazamiento a través del medio es lineal (ver figura 2.4). Este tipo de ondas producen una compresión en el material en el cual se transmiten y, por tanto, el desplazamiento del medio es paralelo a la propagación de la onda. Un claro ejemplo de onda longitudinal es el sonido. Este tipo de onda funciona muy bien en superficies planas aunque en superficies no planas pueden dar

problemas al propagarse en una sola dirección. Además, si se usan en estructuras no adecuadas pueden dar valores erróneos informando de daños en la estructura que no existen debido a su desplazamiento.



**Figura 2.4.** Representación onda longitudinal.

- Ondas transversales: Se trata de unas ondas que perturban las partículas del medio por donde se transmiten desplazándose perpendicularmente a la dirección de propagación (ver figura 2.5). Como se puede observar se parece mucho a una onda longitudinal con la peculiaridad que, además de ir en una dirección en concreto, hace vibrar de forma perpendicular a las partículas que excita formando así una onda como la que representa una senoidal. Al tener características semejantes a las ondas longitudinales también tienen las mismas limitaciones y, por tanto, no es aconsejable usarlas para la búsqueda de defectos en estructuras no planas.



**Figura 2.5.** Representación onda transversal.

Según lo que se ha comentado anteriormente sobre las ondas usadas para la detección de defectos, para nuestro caso del estudio de estructuras cilíndricas nos interesa usar ondas torsionales ya que se propagan por toda la estructura recorriendo toda la superficie y analizando de forma óptima el estado de ésta. No se usan las longitudinales ni las transversales porque se propagan linealmente y, al tratarse de una estructura no lineal puede darnos muchos problemas. El problema más común al usar ondas de propagación lineal en superficies donde se dificulta la realización de este tipo de movimiento es que la mala transmisión de la onda nos puede dar falsos errores en la estructura, provocando así un mal funcionamiento. Por tanto, para estructuras cilíndricas no nos podemos fiar de los resultados obtenidos con ondas longitudinales ni transversales mientras que con las ondas torsionales sí.

## 3. Banco de experimentación

### 3.1. Equipamiento del laboratorio

#### 3.1.1. Sistema de generación de señales y adquisición de datos

Se trata del equipo más importante del banco experimental, ya que es el que nos permite construir las señales de excitación y registrar, para su posterior análisis, los datos recibidos por los sensores instalados.

Para generar la señal de excitación y captar la respuesta de la estructura a dicha excitación se utiliza el programa del PicoScope. Con este programa se manipula el sistema de adquisición llamado "PicoScope 5000". Se trata de un osciloscopio controlado por ordenador, el cual tiene una salida por donde se lanza la señal generada y cuatro entradas para adquirir los datos sensados (resultados del experimento). A continuación se explica en detalle el funcionamiento del equipo y del programa junto a las especificaciones técnicas de este importante equipo.

#### Introducción y ventajas

Se trata del "PicoScope 5000 Series Flexible Resolution Oscilloscope" de la casa Pico Technology. Es un osciloscopio de alto rendimiento ya que hace medidas en tiempo real con gran precisión. Su mayor beneficio es que se conecta mediante puertos USB al ordenador y, mediante un Software propio, se puede controlar a través del ordenador.

Con el software se pueden lanzar una señal de salida cualquiera ya que esta se puede crear mediante cualquier herramienta informática (por ejemplo, Matlab) y luego importarla al PicoScope. Este software también tiene la opción de generar por si mismo algunas señales de salida, controlar diferentes ajustes para la adquisición de datos y realizar programas para que automáticamente haga el lanzamiento de una señal y la recaudación de datos.

## Especificaciones y seguridad

El PicoScope 5000 A tiene un rango de voltaje máximo de medida de  $\pm 20V$  con una protección de sobretensiones de  $\pm 100V$  en los canales de entrada y  $\pm 20V$  en la señal del generador. Para prevenir daños personales, del PicoScope y de los equipos conectados al aparato, se debe tener en cuenta no superar nunca los voltajes especificados anteriormente.

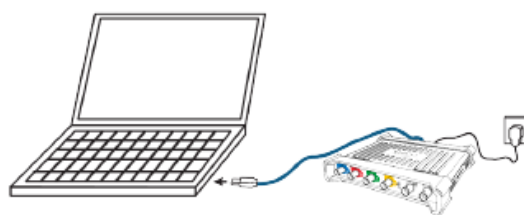
En relación al cable de tierra, es solo para mediciones a través del USB ya que el osciloscopio no tiene toma a tierra de protección.

Para hacer las conexiones externas, al tener 4 salidas, tenemos varias opciones:

- Hasta un máximo de 2 salidas utilizadas se conecta el osciloscopio mediante los dos cables USB al ordenador.
- Si se usan más de 2 salidas se debe conectar el osciloscopio a la red eléctrica y al ordenador mediante un cable USB.



**Figura 3.1.** Conexión máximo 2 salidas [15].



**Figura 3.2.** Conexión mínimo 3 salidas [15].

Para la buena utilización del osciloscopio hay que mantener un ambiente adecuado según la siguiente tabla:

	Almacenamiento	Operativo
Temperatura	-20°C a +60°C	0°C a +40°C (+20°C a +30°C para medidas precisas)
Humedad	5% a 95% (sin condensación)	5% a 85% (sin condensación)
Altitud	2000 m (máximo)	
Grado de polución	2 (máximo)	

**Tabla 3.** Ambiente adecuado [15].

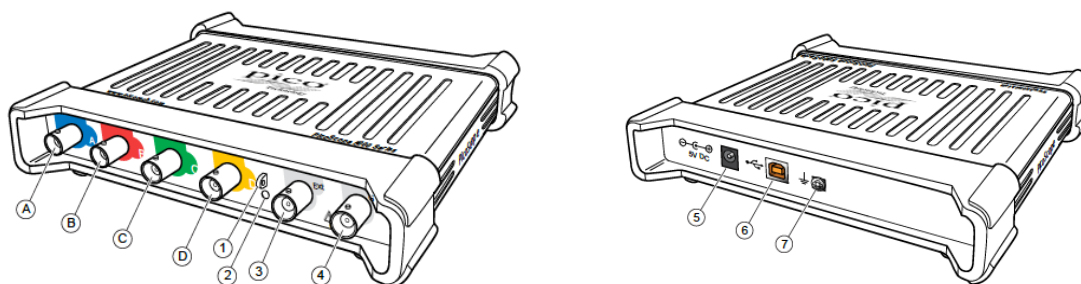
Para la utilización del osciloscopio y su programa se necesitan unos mínimos requerimientos del sistema:

Sistema operativo	Windows 7, Windows 8, Windows 10*. Versiones de 32 bit y 64 bit. El software beta también está disponible para sistemas operativos Linux y OS X .
Procesador	Según requerido para el sistema operativo
Memoria	
Espacio libre del disco	
Puertos	USB 3.0 o USB 2.0 puerto(s)

**Tabla 4.** Requisitos mínimos del sistema [15].

### Diagrama de conexión

En este punto se explica de forma visual y clara la función de cada elemento del equipo y donde se sitúa para encontrarlo físicamente y posteriormente proceder al conexionado del equipo.



**Figura 3.3.** Diagrama de conexión [15].

- A. Canal de entrada A
- B. Canal de entrada B
- C. Canal de entrada C
- D. Canal de entrada D
- 1. Salida prueba compensación
- 2. LED: rojo cuando el Scope está conectado pero no operando. Parpadeos verdes cuando el osciloscopio está capturando datos.
- 3. Entrada disparador externo
- 4. Salida señal generador
- 5. Toma de corriente DC: Para usar con el adaptador AC.
- 6. Puerto USB 2.0: Conectar al PC usando el cable USB suministrado.
- 7. Toma a tierra: Algunas baterías de portátiles pueden producir ruido que puede interferir con las medidas. Si esto pasa, se puede conectar la toma a tierra a un punto a tierra externo para dar una referencia al PicoScope. Esto puede prevenir que el ruido externo interfiera en las medidas. Alternativamente puedes usar el portátil usando el cargador de batería.

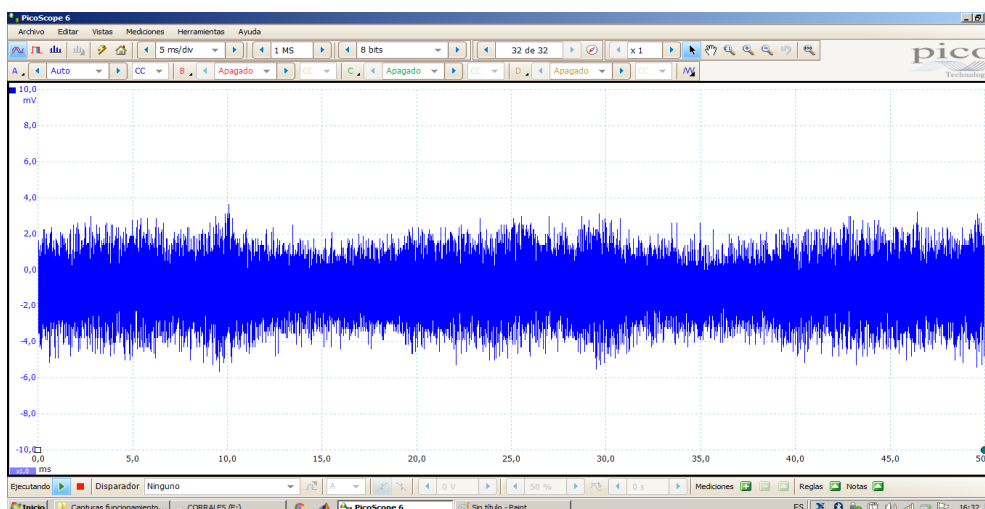


**Figura 3.4.** PicoScope 5000 Series.

## Uso del software

Al ya existir una guía del usuario para conocer el uso de éste software [16], solo se explicarán las funciones necesarias para realizar el banco experimental, sin entrar en profundidad a explicar funciones que no son útiles para el caso en estudio [14]. Los pasos a seguir son los siguientes:

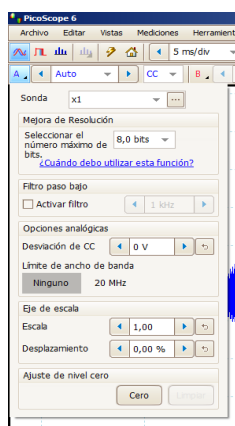
1. Al abrir el programa nos aparece por defecto la pantalla siguiente:



**Figura 3.5.** Software PicoScope 5000 paso 1.

En esta pantalla solamente se enseña el canal A, el cual no está conectado a nada. Por tanto, la señal que aparece es ruido del ambiente.

2. En este momento lo que debemos hacer es quitar en medida de lo posible el ruido de la señal. Para hacerlo se debe pulsar en las opciones del canal que queremos modificar. En nuestro caso, como solo tenemos el canal A activo, se debe pulsar en la letra A, donde se nos abrirá un desplegable.



**Figura 3.6.** Software PicoScope 5000 paso 2.



En el desplegable se puede escoger la sonda utilizada pero como usamos la que viene de serie con el PicoScope 5000 Series, se deja la que viene predefinida. Lo que nos interesa de este desplegable es la opción *Activar filtro*, dentro de *Filtro pasa bajo*. Al activar la opción podemos modificar la frecuencia de éste filtro y, en nuestro caso, se escoge una frecuencia de 300kHz ya que nuestra señal de salida es de 50kHz y dejamos pasar frecuencia por debajo de 300kHz.

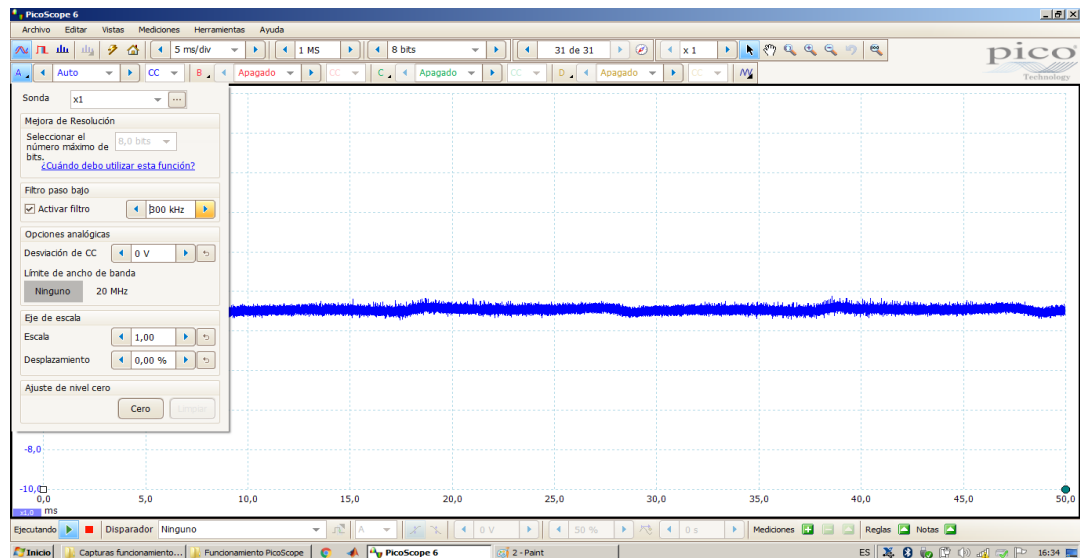
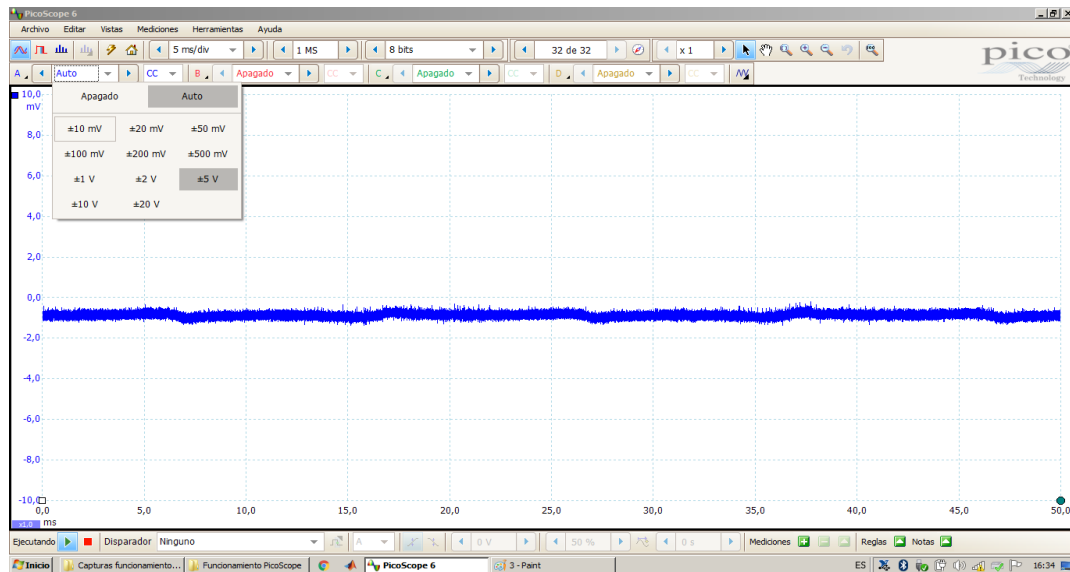



Figura 3.7. Software PicoScope 5000 paso 3.

Como se puede observar nuestra señal ya no tiene tanto ruido al aplicar el filtro pasa bajos.

3. A continuación podemos escoger la escala de voltaje que queramos ya que al dejarlo en automático la señal fluctúa y la escala varía constantemente. Para hacer el cambio de escala se pulsa al lado de la letra de la entrada (en nuestro caso la entrada A) y se escoge la escala que queramos.



**Figura 3.8.** Software PicoScope 5000 paso 4.

4. Una vez se tiene la señal filtrada y con la escala que queramos, es momento de cargar la señal que se usará como señal de excitación del banco experimental. En este momento se debe conectar la salida del PicoScope 5000 Series a la entrada A del mismo equipo. La conexión se hace para poder verificar cuál es la señal de salida tenemos (la leemos con la entrada A del equipo). No debemos preocuparnos por la creación de una sobretensión (el equipo soporta un máximo de  $20V_{pp}$ ) ya que el programa nos deja construir una señal de máximo  $2V_{pp}$ . Una vez tenemos la conexión realizada nos disponemos a crear y activar la señal de salida. Para ello se debe pulsar al siguiente botón: . Este botón abre la pestaña dedicada a la fabricación (o carga) de señales que se llama *Generador de señales*.

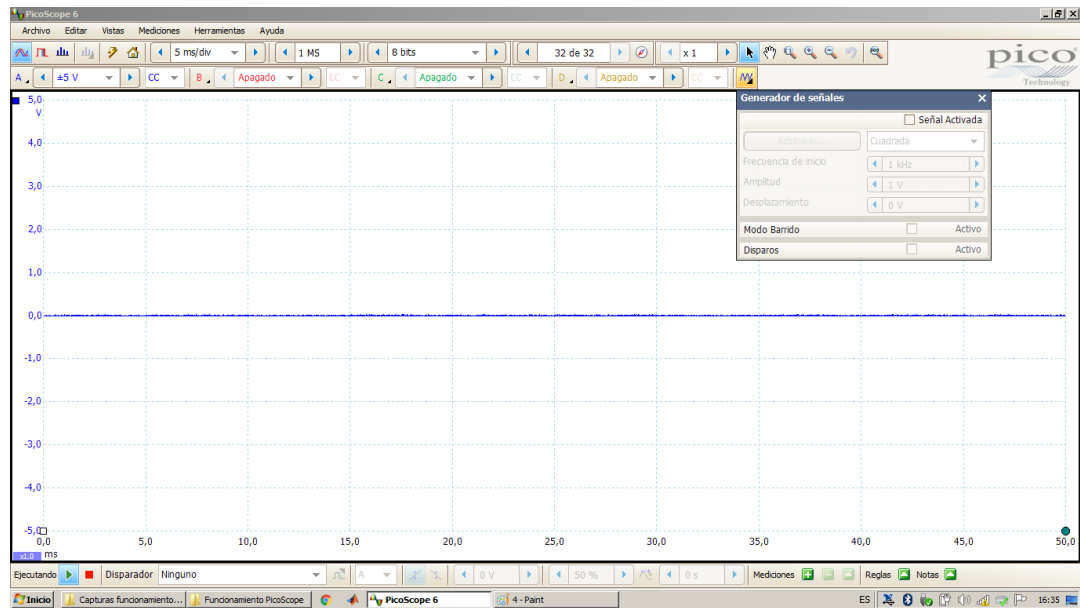


Figura 3.9. Software PicoScope 5000 paso 5.

Una vez tenemos abierta la pestaña del *Generador de señales* debemos activar la opción *Señal Activa* para poder cargar o crear una señal. Al activar la opción se puede ver que ya tenemos una señal visible, una cuadrática. Tenemos esta señal porque es la predefinida al activar el generador de señales. Ahora podemos ver que nos da la posibilidad de fabricar una señal simple como puede ser un seno o una señal cuadrática entre otras. En nuestro caso no se pueden usar las plantillas disponibles porque no da la opción de construir una señal Hanning. Como no usaremos las plantillas del PicoScope 5000 Series, debemos pulsar la opción *Arbitrario...* y se nos abre la pestaña siguiente:

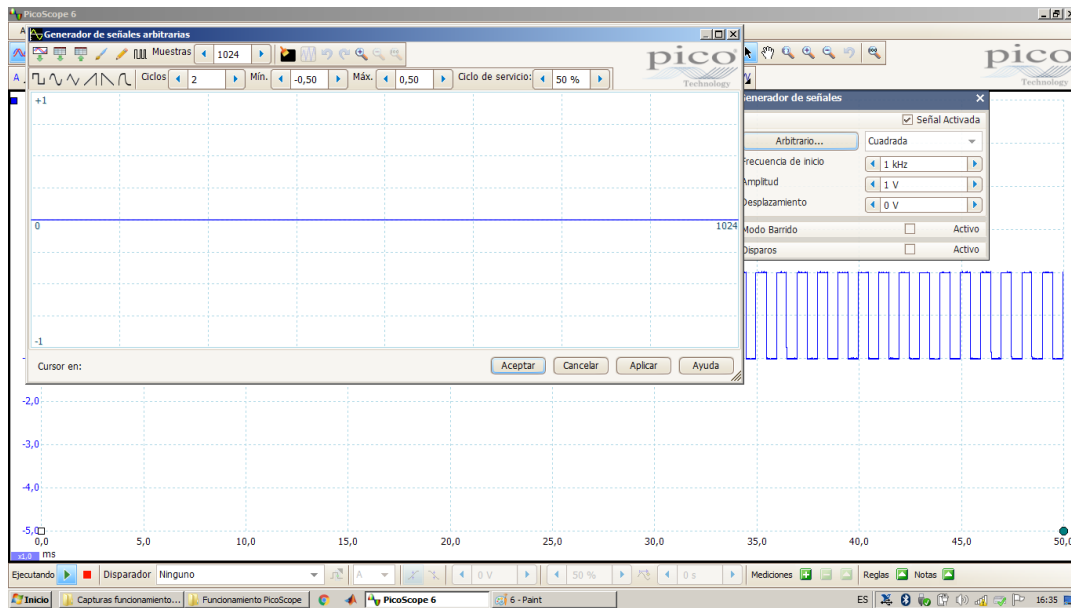


Figura 3.10. Software PicoScope 5000 paso 6.

Una vez dentro de *Arbitrario...* debemos pulsar en *Cargar archivo CSV* (la función es la que está dentro del círculo rojo de la imagen siguiente) para, mediante esta función, poder acceder al archivo que hemos realizado con los datos de nuestra señal Hanning mediante Matlab.

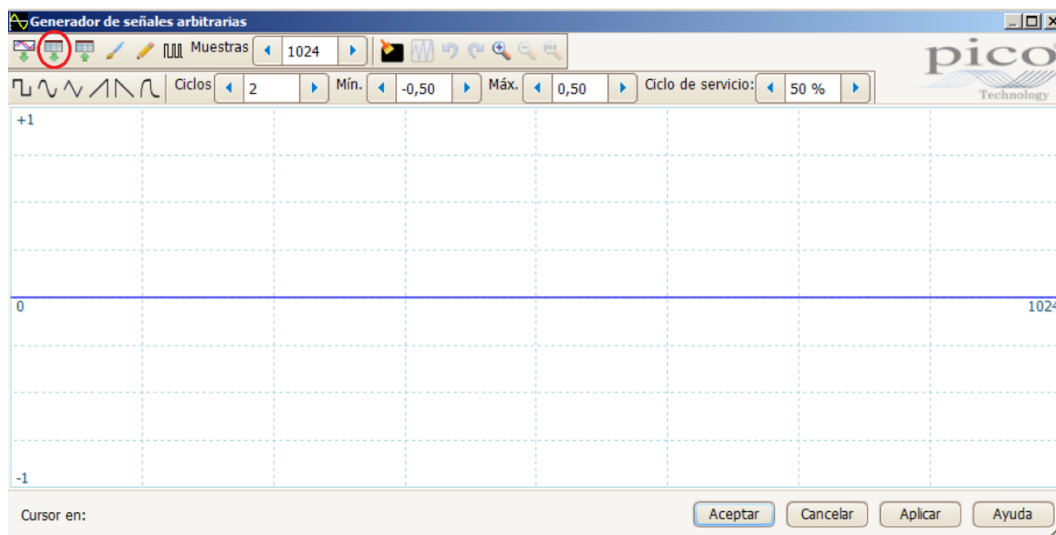


Figura 3.11. Software PicoScope 5000 paso 7.

Una vez dentro del cargador de archivos CSV debemos seleccionar el archivo que contiene los datos de nuestra señal:

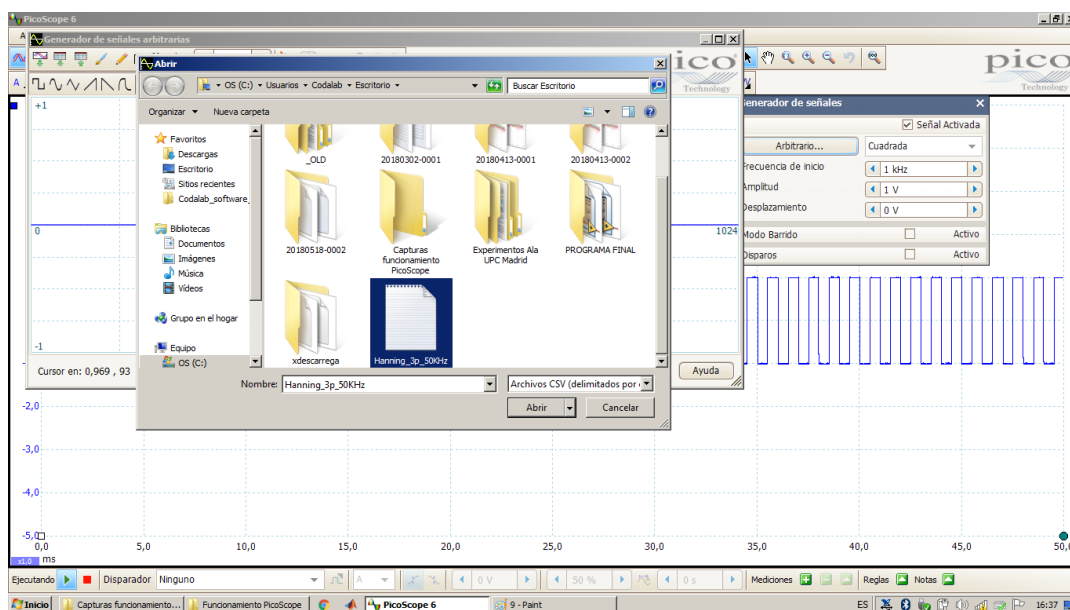


Figura 3.12. Software PicoScope 5000 paso 8.

Una vez seleccionado el archivo en formato CSV pulsamos *Abrir* y se nos abre en el *Generador de señales arbitrarias*.

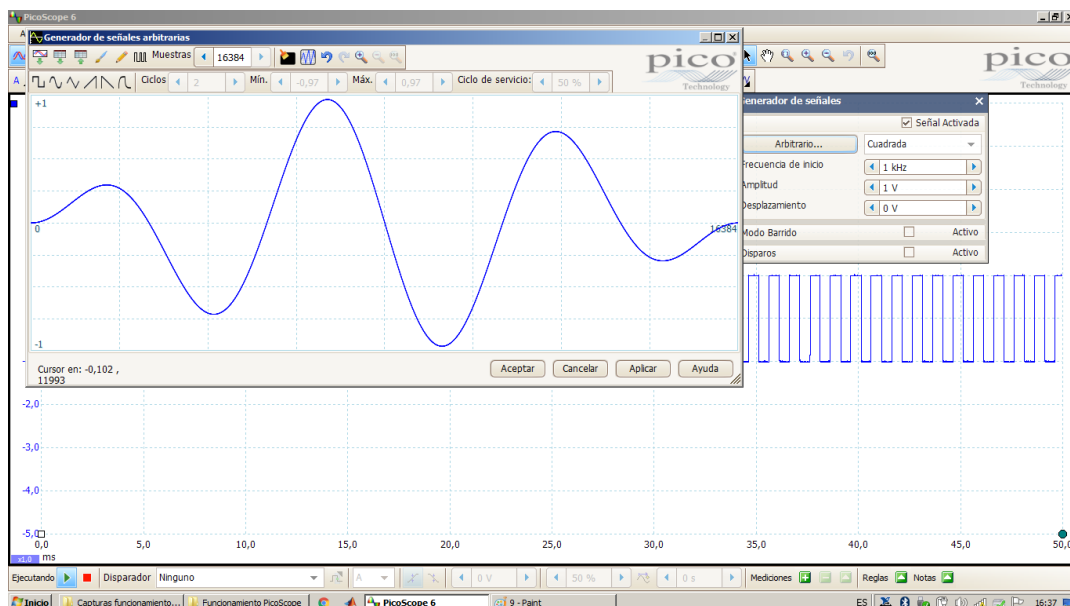


Figura 3.13. Software PicoScope 5000 paso 9.

En este punto ya podemos visualizar la señal que hemos cargado y así verificar si es la correcta. En caso de equivocarnos y cargar una señal no deseada se pulsa en *Cancelar* y se vuelve a realizar el proceso de carga de una señal. El siguiente paso es el de normalizar la señal para que el programa pueda interpretar la señal correctamente pulsando la función dentro del círculo rojo de la siguiente imagen:

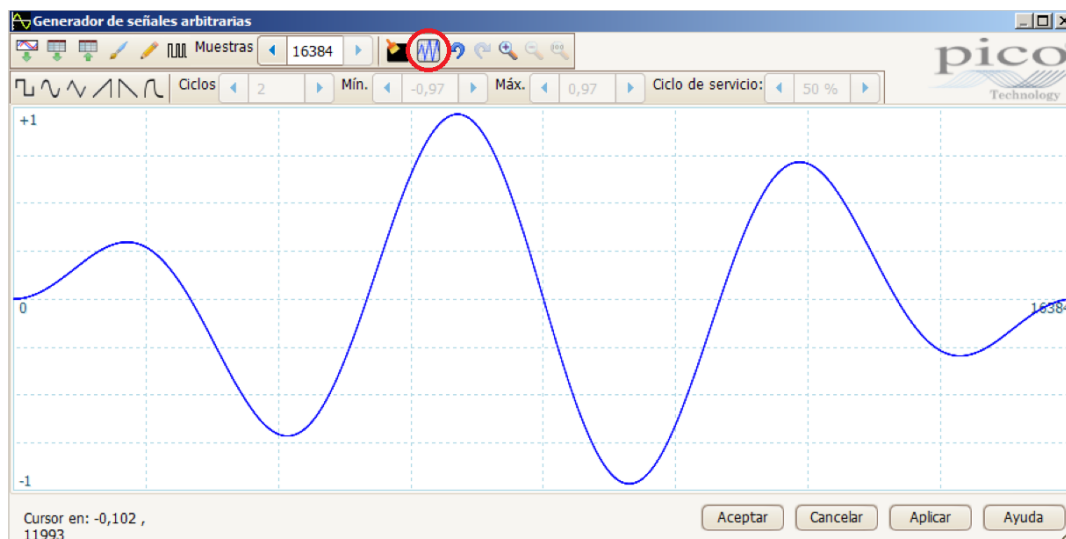


Figura 3.14. Software PicoScope 5000 paso 10.

Como se puede ver, la señal parece la misma pero ésta se ha modificado ligeramente y normalizado. Ahora ya se puede cargar la señal de forma muy sencilla y, para hacerlo, debemos pulsar *Aplicar* y a continuación *Aceptar*. De esta manera ya tenemos en pantalla la señal seleccionada visible y, por tanto, en funcionamiento:

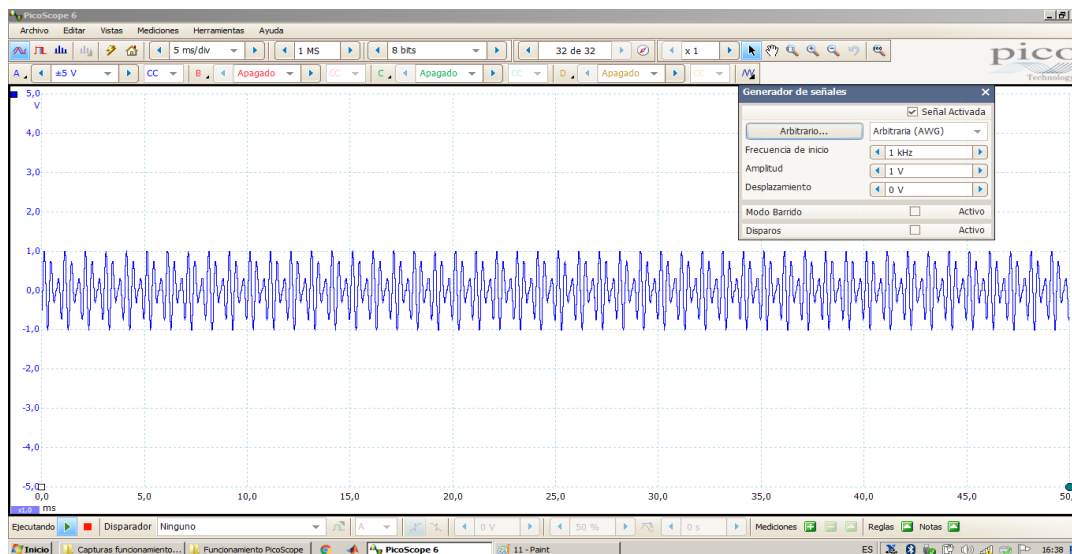


Figura 3.15. Software PicoScope 5000 paso 11.

- Ahora hay que modificar todos los valores dentro de *Generador de señales* según nos convenga. En nuestro caso se usa como frecuencia de inicio 50kHz aunque ésta no es la frecuencia de la señal, sino que es la frecuencia de inicio del programa. Para tener la frecuencia de la señal deseada hay que ir modificando esta frecuencia hasta que la real de la señal sea la que queramos. En relación a la amplitud, se ha puesto 1V aunque se puede poner el máximo (que es de 2V) para amplificar la señal el doble y así tener una señal de salida más potente para poder transmitirla mejor dentro del banco experimental.

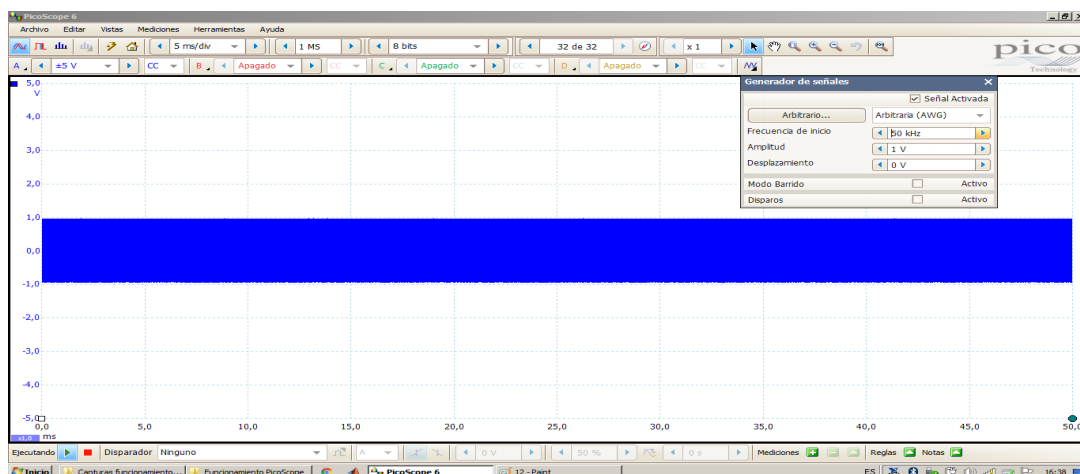


Figura 3.16. Software PicoScope 5000 paso 12.

- Una vez tenemos la señal de salida configurada, podemos observar que, al cambiar la frecuencia de 1kHz (la predefinida) a 50kHz no podemos ver la señal por causa de la escala de tiempo (eje horizontal). Para modificar la escala de tiempo se debe usar la función donde se escoge el tiempo/división que queremos (marcado con un rectángulo rojo en la siguiente imagen). En el caso de nuestra señal se escogen 20 $\mu$ s/div para poder visualizar de forma clara la señal.

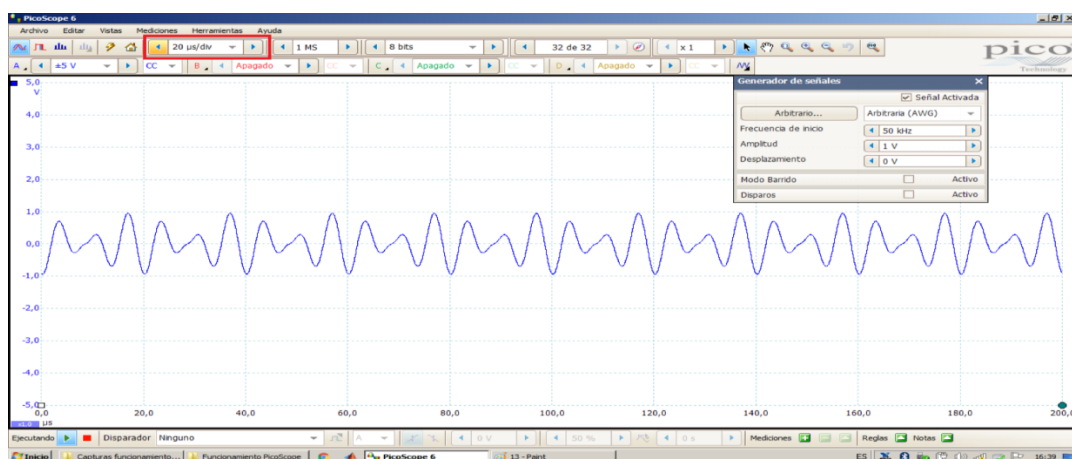


Figura 3.17. Software PicoScope 5000 paso 13.

7. Una vez se visualiza de forma clara la señal de salida se procede a activar el modo *Disparo* que está dentro del *Generador de señales*. Una vez activado se puede observar que tiene diversas opciones.

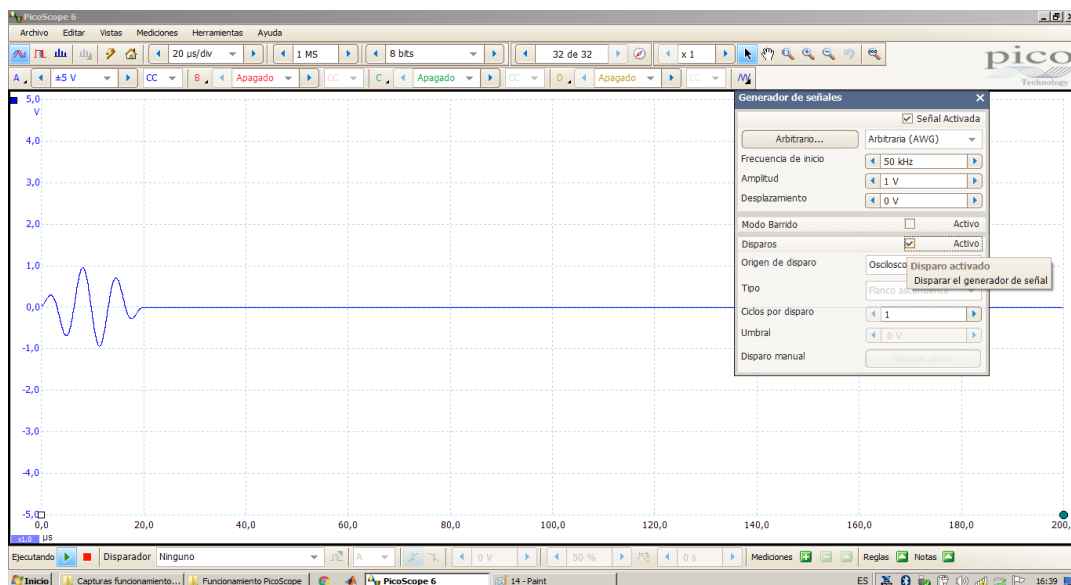


Figura 3.18. Software PicoScope 5000 paso 14.

A nosotros solo nos interesan dos tipos de disparos: *Origen del disparo: Osciloscopio* y *Origen del disparo: Manual* que aparecen en el desplegable. Usando la opción *Osciloscopio* la señal está activa siempre (disparo desde el equipo contante) y, usando la opción *Manual*, solo se aplica la señal cuando nosotros queremos (disparo sale del equipo solo cuando nosotros se lo decimos). En relación al *Tipo*, se deja el que viene predeterminado: *Flanco ascendente*. Para nuestro experimentación dejamos los *Ciclos por disparo* en 1 ya que solo queremos enviar un impulso. Como se puede observar en el desplegable, el último botón *Disparar ahora* se activa solo si estamos en disparo manual y, al pulsar sobre él, se realiza el disparo.

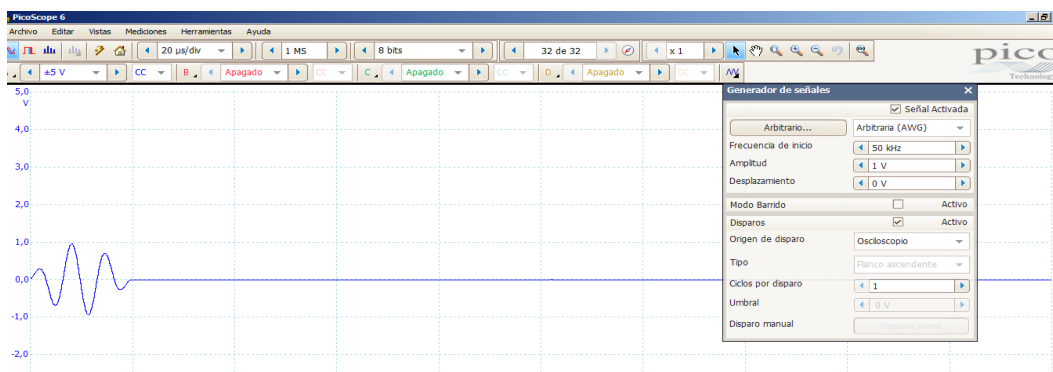


Figura 3.19. Software PicoScope 5000 paso 15.



En la imagen superior se puede apreciar que se ha elegido la opción de disparo *Osciloscopio* y, por tanto, se observa que la señal esta aplicada desde el principio del eje horizontal y de manera constante. Para ver visualmente el funcionamiento del modo *Manual* se adjuntan dos imágenes donde en una se activa el disparo y en la otra no:

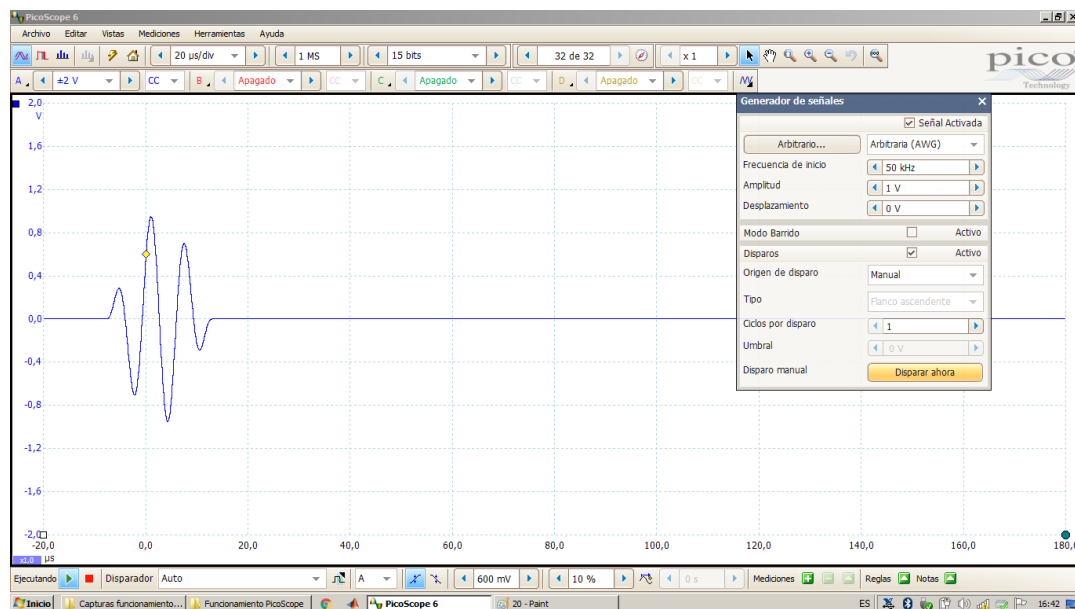


Figura 3.20. Software PicoScope 5000 paso 16.

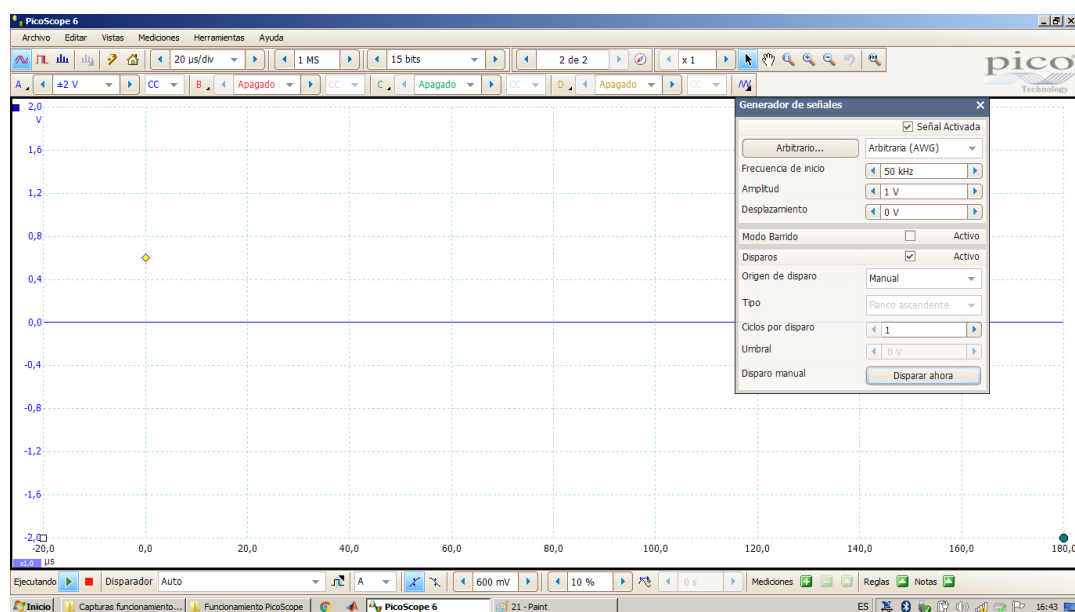


Figura 3.21. Software PicoScope 5000 paso 17.

8. Una vez configurado el desplegable *Generador de señales*, hay que configurar el *Disparador* que está situado en la parte inferior (remarcado con un rectángulo rojo en la imagen siguiente).

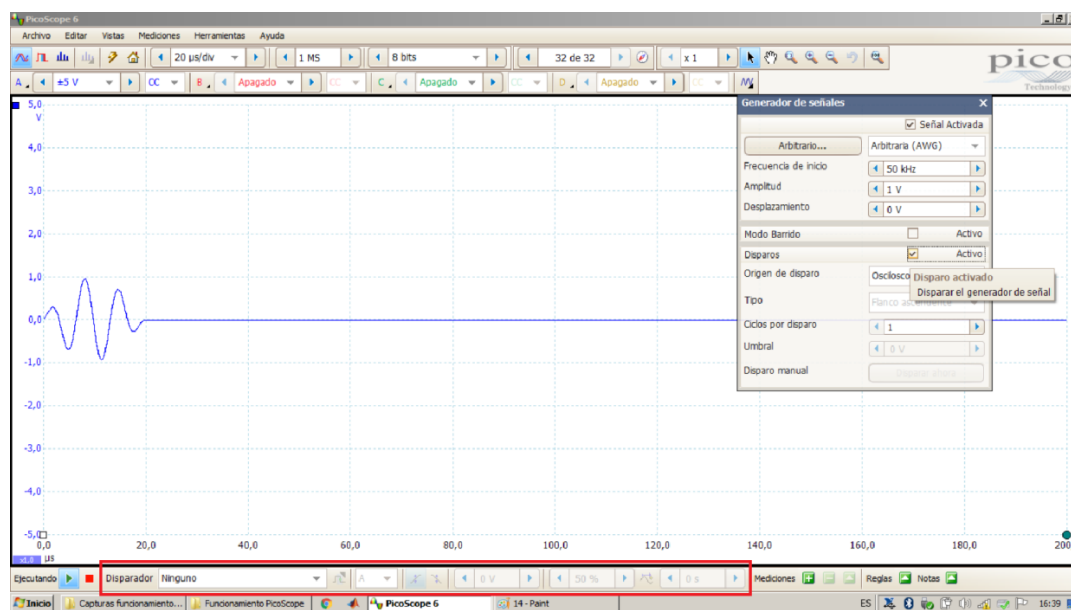


Figura 3.22. Software PicoScope 5000 paso 18.

Lo primero que hay que hacer es poner el *Disparador* en *Auto* (automático) de manera que no tengamos que configurarlo ya que no nos sirve hacerlo al solo usar como origen de disparo el continuo (Osciloscopio) o el manual.

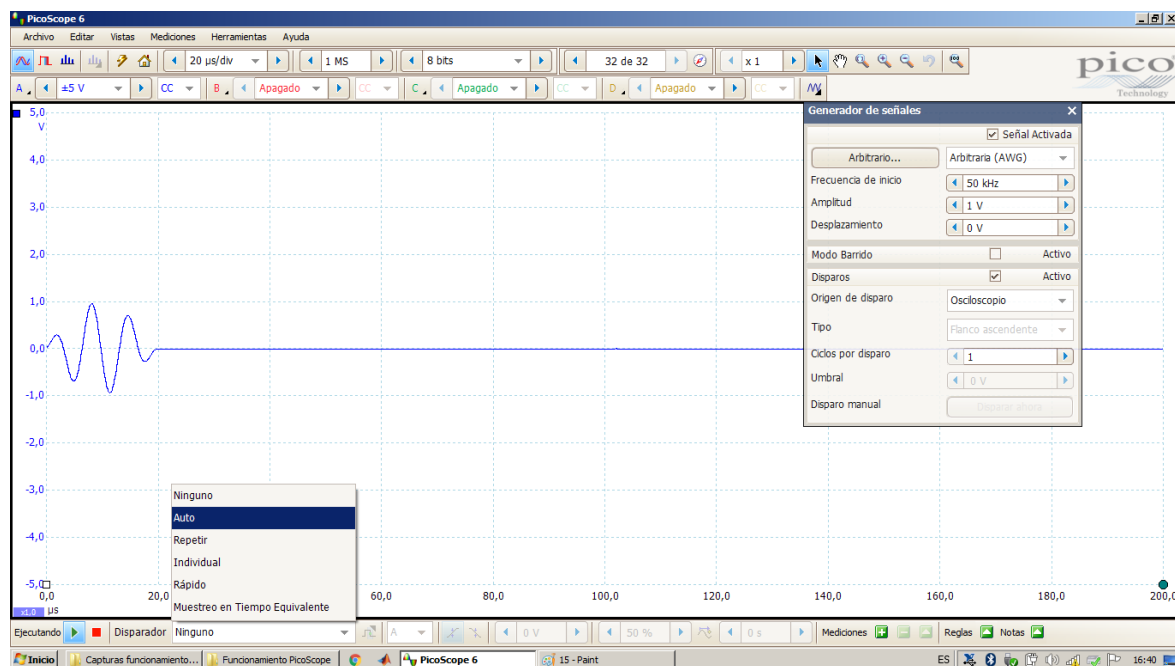


Figura 3.23. Software PicoScope 5000 paso 19.

El siguiente desplegable sirve para escoger en que canal queremos activar la señal y nosotros escogemos el A (aunque normalmente ya viene predefinido y no hay que modificarlo), ya que es con el canal que leemos la señal de salida. El siguiente desplegable sirve para decir al programa cuándo disparar la señal. Para hacerlo se escoge el tipo subida que viene predeterminado. Ahora hay que escoger en qué valor de subida la señal se activará. Como nosotros la activamos de forma manual o la queremos activa siempre hay que evitar que el ruido active o desactive la señal de forma automática. Para ello se pone como límite superior uno lo suficientemente grande para que el ruido de la señal no active el disparador. El valor escogido ha sido de 600mV y visualmente se puede ver mirando el rombo amarillo situado encima de la señal Hanning. La siguiente pestaña que se ve en tanto por ciento modifica dónde se activa nuestra señal, siendo 50% la mitad de la pantalla, 0% el borde izquierdo de ésta y 100% el borde derecho. Nosotros usamos un 10% para poder ver la inicialización de la señal a la derecha y tener la parte central e izquierda para observar y estudiar la señal recibida en respuesta a nuestra señal de salida.

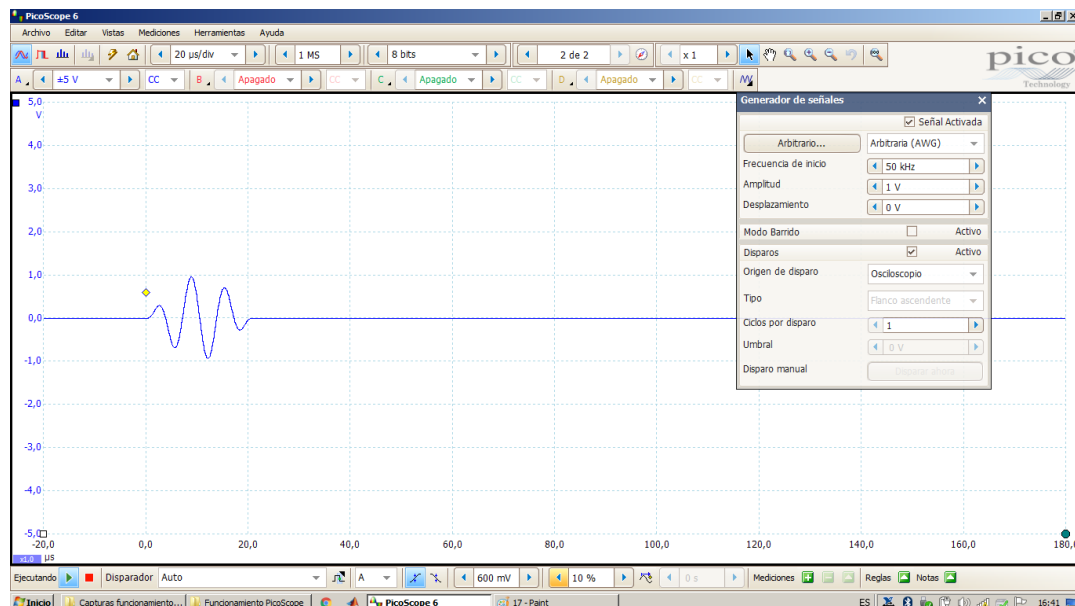


Figura 3.24. Software PicoScope 5000 paso 20.

9. En este momento que ya controlamos la activación de la señal y tenemos definida su posición, hay que mejorar la resolución de captura de datos. Para ello debemos aumentar el número de bits que recoge el programa y subirlo hasta el máximo de nos deje. Se sube hasta el máximo y no hasta un valor concreto porque dependiendo de las entradas activas que tengamos se puede tener un mejor o peor valor de bits disponibles. En nuestro caso el valor máximo disponible es el de 15 bits.

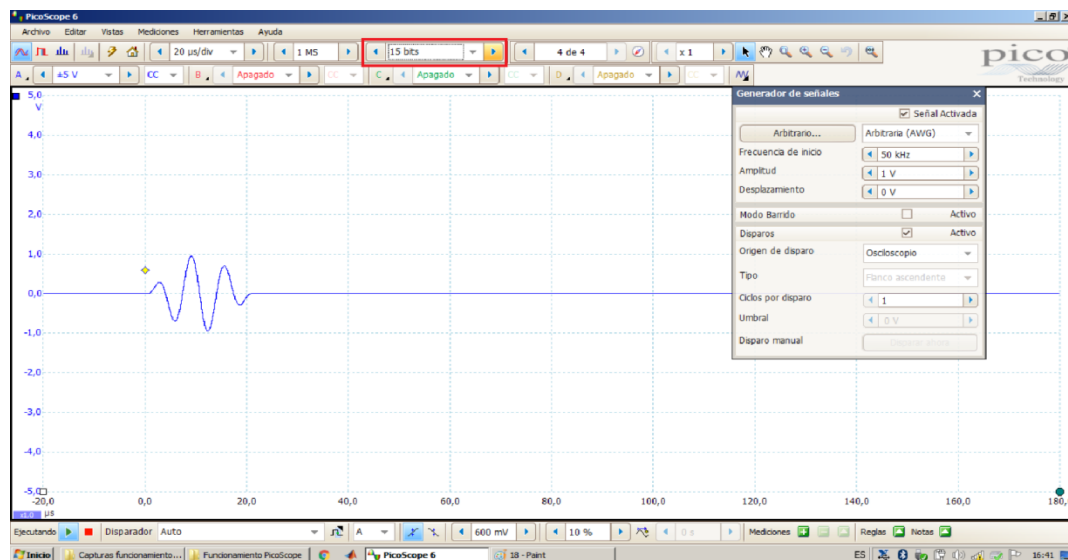


Figura 3.25. Software PicoScope 5000 paso 21.

10. Una vez se tiene la señal lista se procede a conectar la señal de salida a un piezoeléctrico y otro piezoeléctrico a 10cm del primero se conecta directamente al canal B del PicoScope 5000 Series para visualizar la señal recibida. Para hacerlo primero hay que activar el canal B mediante su ajuste de escala pasando de *Apagado* a *Auto* o a un valor constante de voltaje:

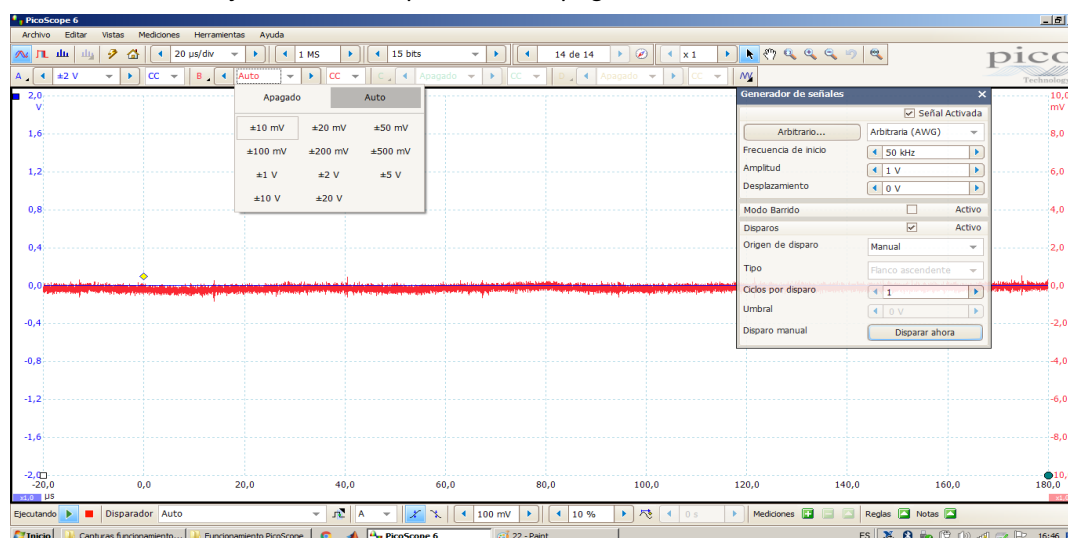


Figura 3.26. Software PicoScope 5000 paso 22.

11. Una vez activado el canal B hay que aplicarle el filtro pasa bajos al igual que hemos hecho con el canal A y con el mismo valor de 300kHz. Una vez aplicado el filtro ya tenemos el canal B listo para observar que recibe el piezoeléctrico al aplicar el impulso de salida al primer piezoeléctrico. Para hacerlo se usa el modo *Osciloscopio* para observar en todas las iteraciones que hace el programa si la señal recibida en el canal B varía o no:

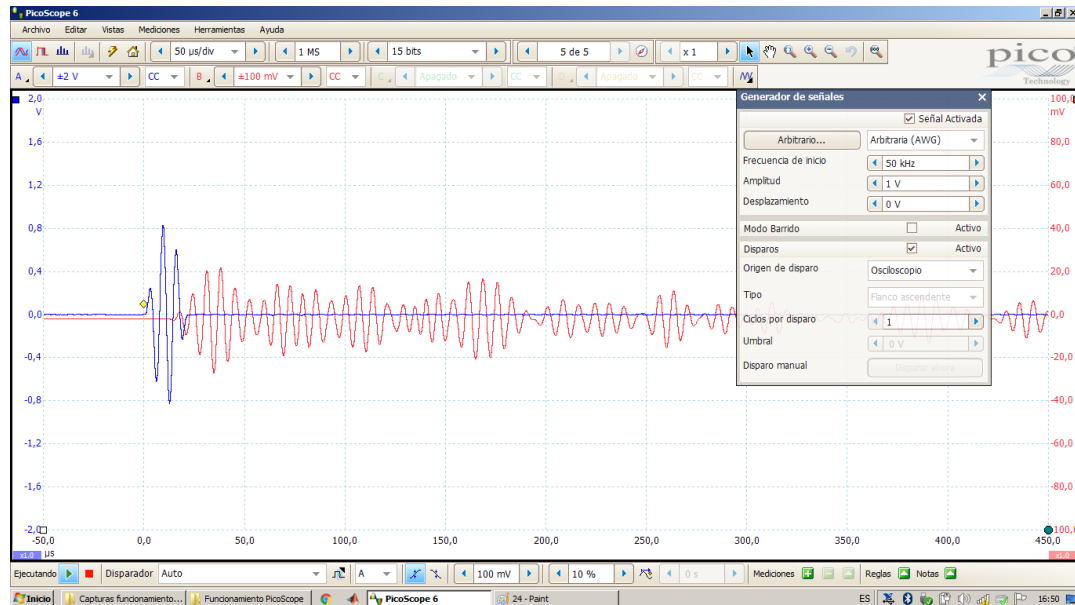


Figura 3.27. Software PicoScope 5000 paso 23.

Tal y como podemos observar, la señal de salida (el impulso externo) en color azul se dispara y, justo antes de que se termine de lanzar la señal de salida, ya obtenemos resultados del piezoeléctrico conectado al canal B.

12. Ahora que ya se sabe cómo lanzar un impulso y como recoger datos de un sensor se debe saber cómo guardar los datos para su futuro análisis. Para ello se debe saber que en la zona inferior, justo al lado del disparador, se encuentra un botón de *play* y otro de *pause*. Para empezar nuestro experimento debemos pulsar al *play* y el programa irá guardando datos en diferentes instantes hasta un máximo de 32. El número de instantes se pueden ver en la parte superior al lado de la resolución en bits. Una vez realizados los experimentos y antes de que se llegue al instante 32 (el último) se debe pulsar el *pause*. Al pulsar el *pause* el programa queda congelado, es decir, no captura más datos ni pierde los capturados.

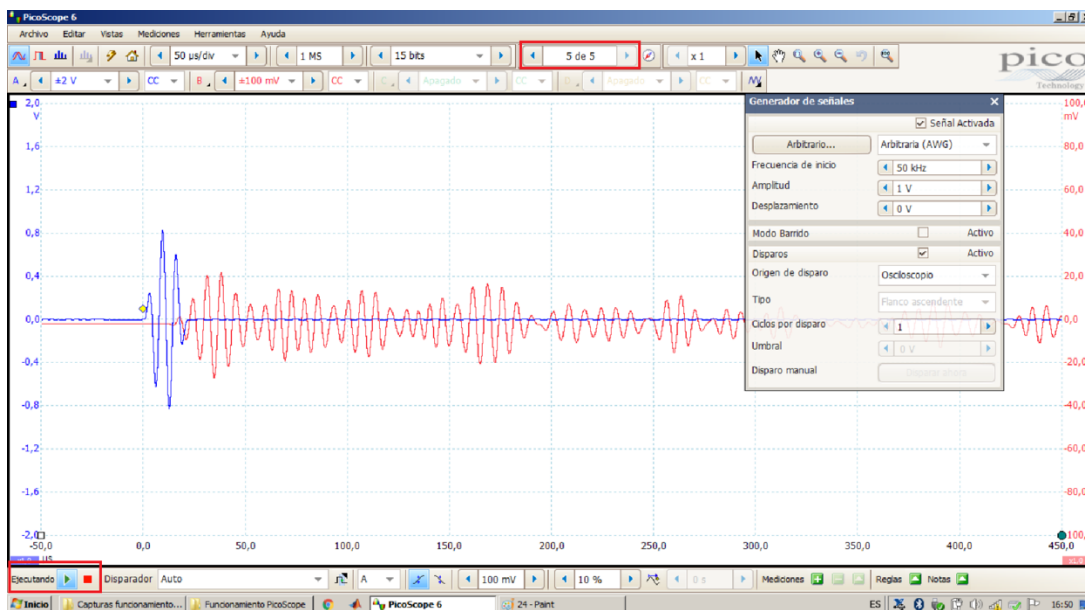


Figura 3.28. Software PicoScope 5000 paso 24.

En este momento debemos guardar el archivo. Para guardarlo debemos ir a *Archivo, Guardar como*. Una vez estamos dentro de la pestaña *Guardar como* tenemos diferentes tipos de archivo para hacerlo. El archivo más completo es el *“.psdata”* el cual guarda los datos en el formato del programa del PicoScope 5000 Series, es decir, al abrir los datos tenemos la misma información que la que disponemos al hacer los experimentos (como si estuviéramos experimentando con el programa abierto). Otro archivo que nos puede interesar al guardar es el *“.png”* el cual guarda cada experimento como imagen creando una carpeta con las señales guardadas en formato imagen y separadas cada una como una imagen independiente. Por último, si lo que queremos es tener los valores numéricos de cada experimento, podemos guardar el archivo como *“.mat”* para tenerlo en Matlab o *“.txt”* para únicamente tener los valores de cada canal estudiado.

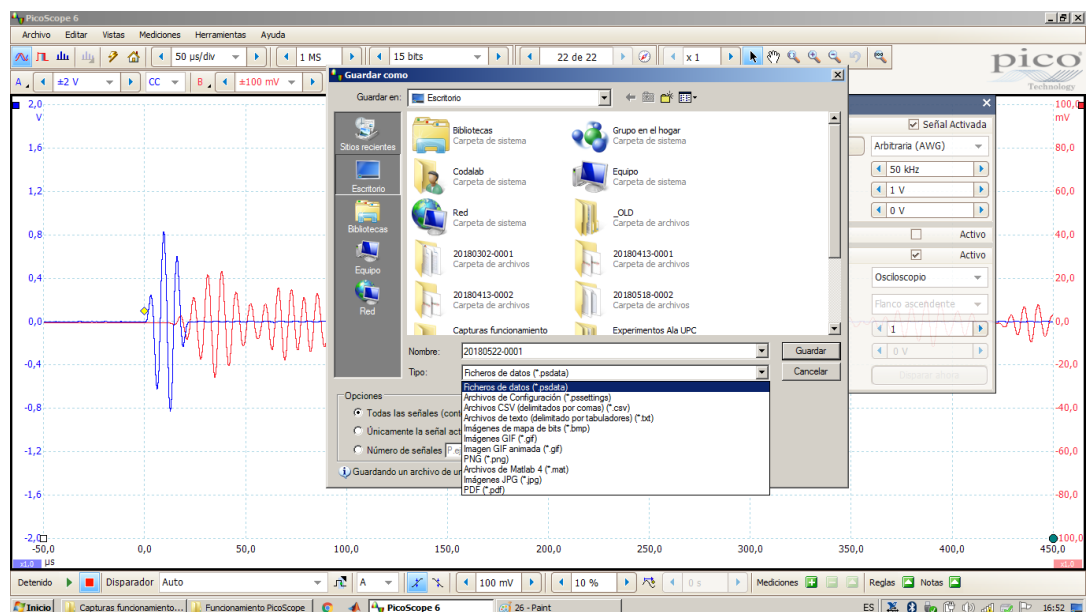
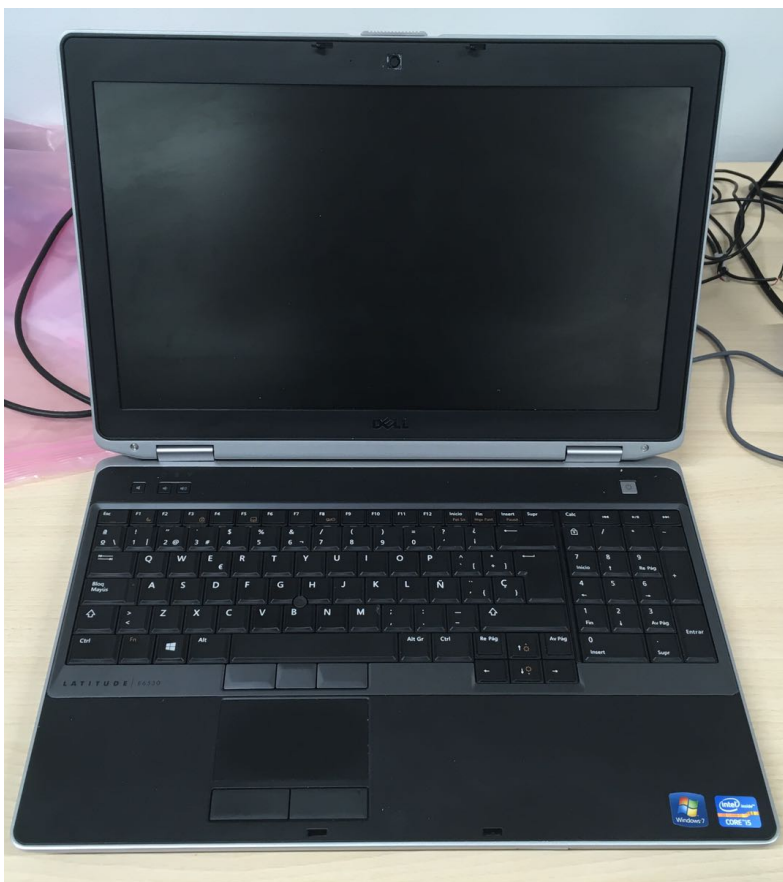


Figura 3.29. Software PicoScope 5000 paso 25.

### 3.1.2. Ordenador

Para la utilización del PicoScope 5000 Series y la obtención de datos y gráficas se necesita un ordenador que pueda soportar el software del osciloscopio. El ordenador utilizado es un Dell Latitude E-6530 del laboratorio CoDALab. Las especificaciones básicas del portátil son las siguientes:

1. Procesador: Intel Core i5 3320M
2. Memoria RAM: 4GB
3. Almacenamiento: 500GB
4. Windows 7 Profesional
5. Entradas USB: Dos entradas 2.0 y una entrada 3.0



**Figura 3.30.** Ordenador utilizado.



### 3.1.3. Amplificador de voltaje

Como el PicoScope 5000 Series solo permite lanzar una señal de salida de máximo 2V, debemos amplificar la señal de salida del PicoScope para que, al llegar la señal al elemento encargado de transmitirla a la estructura a estudiar, se pueda propagar mejor al tener un voltaje superior y, por tanto, propagarse de manera más efectiva. Con esta amplificación conseguimos recibir una señal mejor en el sensor que la recibe ya que con solo los 2V que nos permite el PicoScope 5000 Series la señal apenas llegaba al sensor para su futuro estudio. Para realizar la amplificación del voltaje comentado anteriormente se usará el amplificador modelo 7602M *Wideband Amplifier*.

Este amplificador puede aportar 34 watts de potencia continua (68 watts a dc) y es capaz de amplificar a un máximo de 282Vrms (800V<sub>pp</sub>) hasta una frecuencia de 500KHz.

Potencia	34watts de potencia continua (68watts a dc)
Voltaje de salida	282Vrms o 800V <sub>pp</sub>
Voltaje de entrada	±200V
Frecuencia	500 KHz
Distorsión armónica	<0.3% a 100KHz
Rango de temperatura	0°C a 45°C

Tabla 5. Especificaciones 7602M [18].



Figura 3.31. Amplificador 7602M [18].

### 3.1.4. Amplificador de corriente

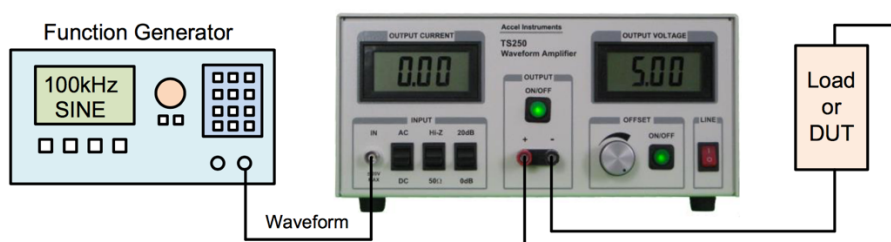
Como la señal de salida es débil y se necesita bastante intensidad para su buena propagación por el medio es necesario amplificar la señal de salida del generador de señales. Para hacerlo se utiliza el amplificador *TS250-1 waveform amplifier* del laboratorio. Sus características básicas son las siguientes:

Amplificación máxima	6A
Ganancia	0dB / 20dB
Corriente de entrada	AC / DC
Rango de voltaje de salida	De -20 a +20 V
Impedancia de entrada	50Ω / 1kΩ
Velocidad de transmisión de salida	16 V/μs
Temperatura de operación	0 a 40°C
Rango operacional de humedad	20 a 80 %

**Tabla 6.** Especificaciones *TS250-1* [17].



**Figura 3.32.** *TS250-1* del laboratorio



**Figura 3.33.** Conexionado del *TS250-1* [17].

### 3.1.5. Soldador

Para realizar el conexionado de los cables con los PZT's se necesita el uso de un soldador. El soldador utilizado es el modelo *VTSS4N*. Se trata de un soldador que tiene un rango de temperaturas de 150°C a 450°C la cual se puede regular mediante la rueda seleccionadora de temperatura [12].

#### Modo de empleo

1. Poner el soldador en el soporte habilitado para ello.
2. Conectar el aparato a una toma de corriente de 230V/50Hz.
3. Encender el soldador y escoger la temperatura deseada. Una vez escogida la temperatura esperar unos minutos a que el soldador llegue a la temperatura adecuada.
4. Una vez se consigue la temperatura deseada se saca el soldador de su soporte y ya está listo para ser usado.



Figura 3.35. Soldador *VTSS4N*



Figura 3.34. Soldador *VTSS4N*

### 3.1.6. Sensores piezoeléctricos

Los sensores piezoeléctricos son unos dispositivos que transforman medidas de presión, fuerza, tensión y aceleración en señales eléctricas. Gracias a la transformación a señales eléctricas se usan para poder procesar el señal y obtener datos claros del efecto de presiones y fuerzas en estructuras. Al aplicar una fuerza en el piezoeléctrico, la carga eléctrica se acumula en la superficie opuesta provocando así la señal.

En relación a los sensores utilizados para la experimentación se usan dos tipos diferentes según su posición en la estructura pero de misma referencia y tamaño. Se trata de unos sensores de *Pi Ceramic*, en concreto el modelo *PRYY+0110* [20].



**Figura 3.36.** PZT *PRYY+0110* para capa exterior



**Figura 3.37.** PZT *PRYY+0110* entre estructuras

Sus características son las siguientes:

<b>Diámetro exterior</b>	10mm
<b>Espesor</b>	0,5mm
<b>Frecuencia resonante (espesor)</b>	4000kHz
<b>Frecuencia resonante (radial)</b>	200kHz
<b>Capacitancia eléctrica</b>	2,280nF
<b>Material</b>	PIC255
<b>Factor de acoplamiento para la oscilación radial</b>	0,62
<b>Factor de acoplamiento para la oscilación de espesor</b>	0,47

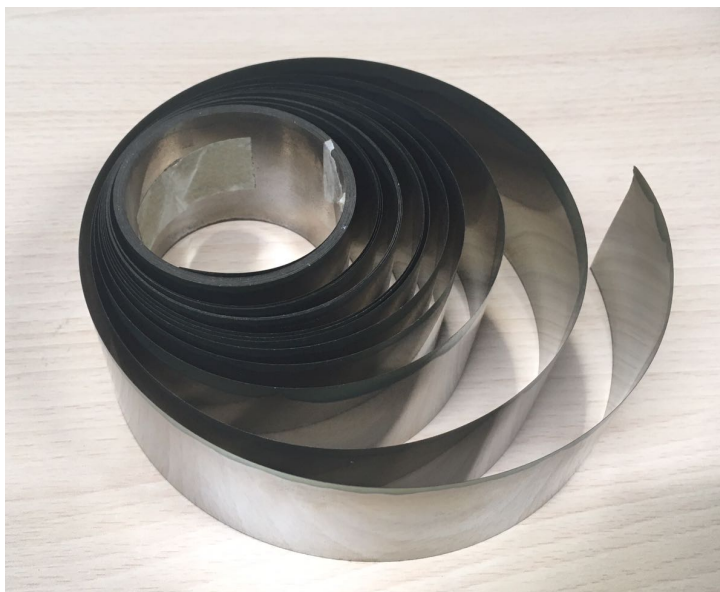
**Tabla 7.** Características PRYY+0110 [20].

### 3.1.7. Material magnetostrictivo para generación

Al no disponer de actuadores magnetostrictivos se deben fabricar en el laboratorio. Por este motivo se ha comprado material magnetostrictivo que, junto a otros elementos que se explican en el montaje, nos servirán para crear el actuador.

Se trata del componente más crítico del sistema magnetostrictivo usado para transformar energía eléctrica en mecánica y viceversa. Su eficiencia en la adquisición y transmisión depende mayoritariamente de sus propiedades físicas. Por tanto, es muy importante seleccionar el material según sus propiedades físicas para poder construir un buen actuador magnetostrictivo.

El material magnetostrictivo ha sido adquirido de la compañía *Guided Wave Analysis LLC*. La lámina consiste en tiras amorfas de cobalto-hierro de 0,15 mm de grueso, el cual tiene gran capacidad para la magnetostricción.



**Figura 3.38.** Material magnetostrictivo

## 3.2. Montaje de la estructura a analizar

### 3.2.1. Estructura utilizada

La estructura utilizada para la realización del banco experimental se compone de unos tubos de hierro que simulan tuberías de agua. Éstos tienen un diámetro interior de 7cm con un espesor de 2mm, una longitud total de 55cm y el diámetro de la base es de 16cm.



**Figura 3.39.** Estructura utilizada.

En sus extremos tienen cuatro agujeros a 90º entre ellos pensados para usarse al unir diferentes tubos consecutivos. El diámetro de los agujeros es de 12mm. Estos agujeros sirven para poder unir dos o más estructuras entre ellas mediante tornillos.



**Figura 3.40.** Detalle agujeros extremo del tubo.



### 3.2.2. Construcción del actuador magnetostrictivo

Al no disponer de un actuador magnetostrictivo se debe fabricar uno. Para poder obtener una señal torsional en el actuador se debe usar el material magnetostrictivo junto a una bobina para crear una onda torsional [11]. Los pasos a seguir para su fabricación son los siguientes:

1. Cortar el material magnetostrictivo de manera que ocupe todo el diámetro exterior de la estructura a estudiar. Se trata de medir el diámetro exterior de la estructura y cortar un trozo de material magnetostrictivo de la misma longitud que el diámetro. Una vez se tiene la longitud deseada se debe marcar en el material para poder cortarlo con precisión.



**Figura 3.41.** Línea de corte en material.



**Figura 3.42.** Corte del material.

Al cortar el material hay que hacerlo con decisión y lo más rápido posible ya que si se corta lentamente tiende a cortarse a  $45^\circ$ . Esto es debido a la estructura interna del material, la cual tiende a cortar en esta dirección.



**Figura 3.43.** Corte accidental provocado por el material a  $45^\circ$ .

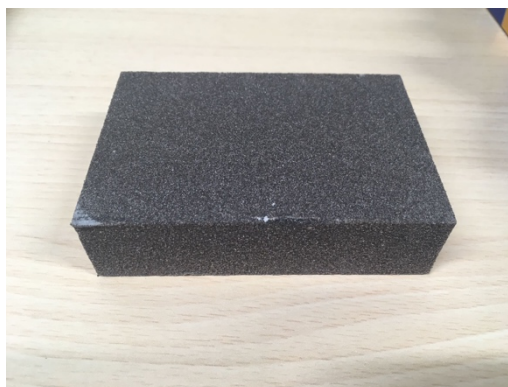
2. Una vez se tiene el material cortado se procede a colocarlo en la estructura para marcar donde irá posicionado. Se debe posicionar a unos 2cm del extremo de la estructura, tal y como se puede apreciar en la siguiente imagen.





**Figura 3.44.** Marcación del material magnetostrictivo en la estructura.

3. Una vez se tiene marcada en la estructura la posición del actuador se debe limpiar la zona usando papel de lija. Con esta limpieza se asegura tener la superficie sin suciedad y lo más plana posible para mejorar la transmisión de la señal.



**Figura 3.45.** Papel de lija.



**Figura 3.46.** Limpieza de la zona donde se instala el actuador.



**Figura 3.47.** Superficie limpia de impurezas.

Una vez se tiene la zona lijada y libre de suciedad se hace una limpieza superficial con acetona y con la ayuda de un trapo para eliminar el polvo restante en la zona lijada.

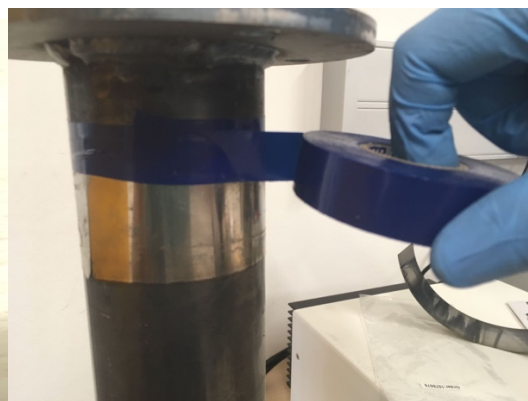


**Figura 3.48.** Limpieza final con acetona.

4. Al tener la zona completamente limpia se debe pegar el material magnetostrictivo a la estructura. Para hacerlo se usa cinta para pegarlo a la tubería.

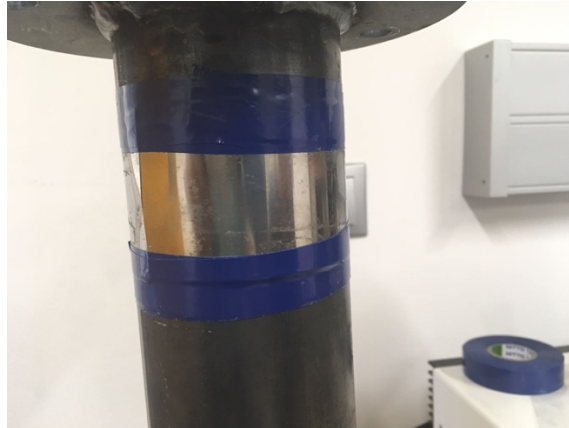


**Figura 3.49.** Cinta utilizada.



**Figura 3.50.** Pegado del material magnetostrictivo.

Para pegar el material hay que realizar dos pasadas con cinta en la parte superior y dos más en la parte inferior. Estas pasadas deben tapar el material 1cm en los extremos superior e inferior para asegurar que toda la superficie de la lámina haga contacto con la estructura.



**Figura 3.51.** Lámina pegada en la estructura.

5. Para la realización de la experimentación y estudio del funcionamiento del actuador magnetostrictivo se instala otro en el extremo opuesto de la estructura. Para instalarlo se siguen los mismos pasos que el anterior actuador. Al instalar dos actuadores se pueden diseñar dos bobinas diferentes para así comprobar qué diseño es más efectivo.



**Figura 3.52.** Estructura con los dos actuadores instalados.

6. En este punto ya se puede magnetizar el material magnetostrictivo. Se magnetiza para poder utilizarlo como actuador junto al uso de una bobina. Para hacerlo se usa un imán el cual se debe pasar de forma vertical por todo el perímetro de la estructura pasando por encima del material magnetostrictivo. Para hacer la magnetización efectiva debe pasarse en sentido anti horario recorriendo el material sin despegar el imán y realizando un mínimo de 3 vueltas consecutivas.

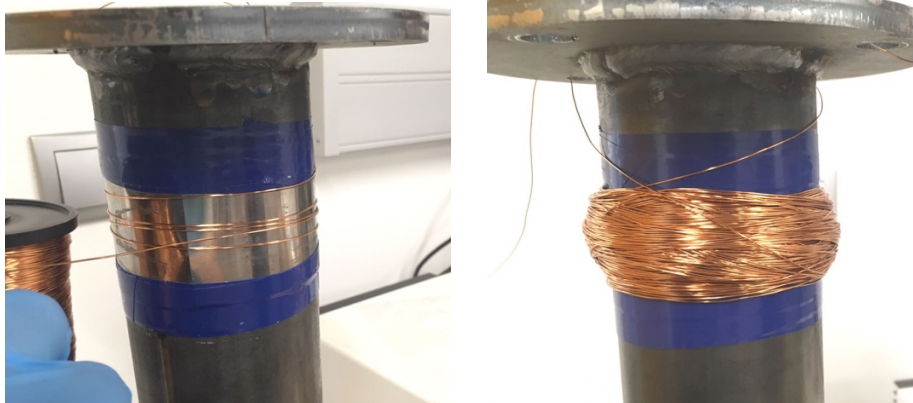


**Figura 3.53.** Imán .



**Figura 3.54.** Magnetización del actuador.

7. Una vez magnetizados los dos actuadores se deben bobinar. Al bobinar se debe tener en cuenta que la bobina no salga de la cinta azul de manera que la bobina solo se aplica en el centro del material magnetostrictivo. Para ello se bobinan de diferente manera para estudiar de qué forma es más efectivo el actuador. Una vez se ha bobinado el material se debe tapar con cinta la bobina para evitar daños y que entre suciedad en ésta:
- a. Bobinado con muchas vueltas:



**Figura 3.55.** Bobinado tipo a.



- b. Bobinado con una sola capa y con los cables organizados de forma precisa:

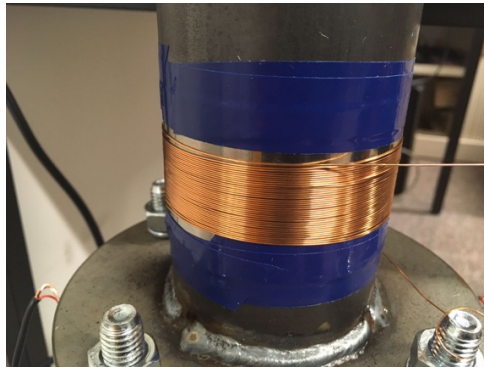


Imagen 3.56. Bobinado tipo b.



Figura 3.57. Detalle bobinado tipo a y tipo b tapados.

El alambre de cobre utilizado para realizar la bobina es de *Rowan Cable* con 0,5 mm de diámetro.



Figura 3.58. Alambre de cobre.

8. Una vez se tienen las bobinas instaladas y protegidas se deben pelar las puntas del alambre usados para poder dar corriente. Se deben pelar para eliminar la capa protectora y aislante que tienen para así conectarlos y que la electricidad pueda fluir por ellos.

### 3.2.3. Conexión y pegado de los piezoeléctricos

El pegado de los piezoeléctricos se realiza a una estructura diferente a la que tiene los actuadores magnetostrictivos. Los piezoeléctricos que se tienen que pegar primero son los que están en la superficie del tubo. Para realizar el correcto pegado y conexionado de los piezoeléctricos para obtener los datos lo mejor posible hay que seguir una serie de pasos:

1. El primer paso es marcar la posición donde se quiere instalar los piezoeléctricos en la superficie. Se deben instalar dos piezoeléctricos opuestos entre sí a una distancia aproximada de unos 2 cm del extremo del tubo.



Figura 3.59. Punto posición PZT.

2. Una vez marcada la posición con un rotulador se debe proceder a limpiar la zona donde se pretende pegar el sensor. Para limpiar la zona se usa un taladro de *Alpha Tools* modelo ASE 14,4-1 y un accesorio para pulimiento de superficies metálicas de la marca *STANLEY*. Para la limpieza que se debe llevar a cabo el mejor accesorio es el cilíndrico de diámetro 20 mm o el cónico de diámetro 15mm.



Figura 3.60. Taladro utilizado.



Figura 3.61. Accesorios para el taladro.

Una vez montado el accesorio en el taladro se procede a la limpieza de la parte del tubo donde se quiere pegar el piezoeléctrico. Para limpiar se debe asegurar hacerlo en una superficie suficientemente grande para que el PZT esté en el punto correcto y con toda su superficie apoyada en una zona limpia.



**Figura 3.62.** Detalle limpieza superficie.

Ahora que ya se tiene la zona limpia se debe volver a marcar la posición del PZT para verificar que se ha limpiado suficiente superficie para la correcta instalación. Si no es así se debe seguir limpiando la zona hasta tener la suficiente para la correcta instalación.



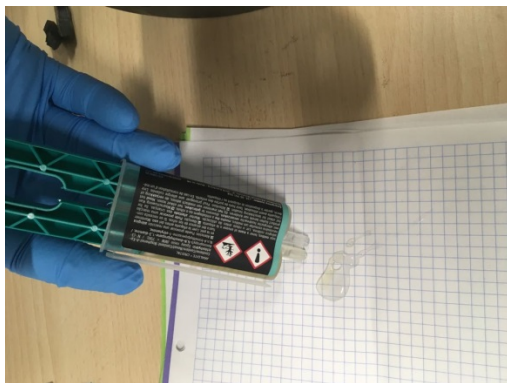
**Figura 3.63.** Marcación posición PZT.

3. Al tener la zona completamente limpia se debe proceder al pegado de los piezoeléctricos. Para pegarlos se usa el *Araldite Cristal* de dos componentes. Se usa este pegamento porque pega en 5 minutos y puede pegar todo tipo de materiales. Se usa de dos componentes ya que se trata de un pegamento más resistente.

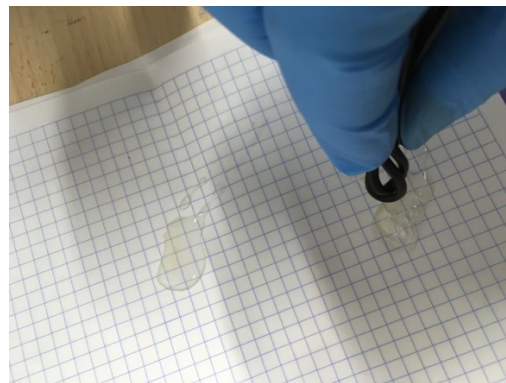


**Figura 3.64.** *Araldite Cristal.*

Al abrir el *Araldite Cristal* hay que usar guantes para evitar dañarnos las manos. Una vez abierto se aplica un poco de producto encima de una zona acondicionada para ello y se deben mezclar lo mejor posible los dos componentes. Recordar que la primera cantidad de producto que se use debe descartarse ya que así lo indican las instrucciones.



**Figura 3.65.** Aplicación pegamento.



**Figura 3.66.** Mezcla del pegamento.

Al tener el *Araldite Cristal* bien mezclado se procede a aplicarlo en la zona limpia del tubo. Hay que poner la cantidad suficiente para asegurar que en toda la superficie del PZT habrá pegamento y así asegurar que el 100% del elemento este en contacto con el tubo.





**Figura 3.67.** Posicionado PZT con pegamento.

Una vez posicionado el PZT y con el pegamento aplicado hay que mantenerlo a una presión constante hasta que esté completamente pegado. Para hacerlo se usa un imán que se debe poner encima del PZT evitando dañarlo y evitando que el imán toque el pegamento ya que podría quedar pegado imposibilitando su extracción.



**Figura 3.68.** Posicionado imán.

Hay que tener en cuenta que para la instalación del segundo PZT en la parte contraria al tubo donde se ha instalado el anterior se deben seguir los mismos pasos y, sobretodo, utilizar el mismo imán para así asegurar la misma presión en la etapa de secado del pegamento en todos los piezoeléctricos.

4. Una vez se tiene el PZT pegado se deben conectar los cables para poder obtener la información que reciba. Para realizar la conexión es necesario soldar los cables entre ellos y luego soldarlos al PZT. Los pasos a seguir son los siguientes:
  - 4.1 El primer paso es el de soldar los cables. Para ello se debe unir el cable blanco junto al cable que viene sin aislante. Para hacerlo se deben unir manualmente y, una vez unidos, se deben untar de pasta de soldadura para mejorar la soldadura. Al tener los dos cables

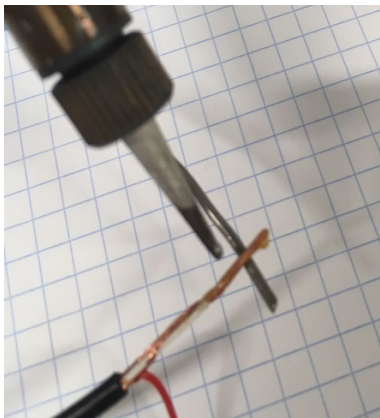
juntos y con pasta de soldadura se procede a soldarlos mediante el soldador (previamente calentado) y el material de unión.



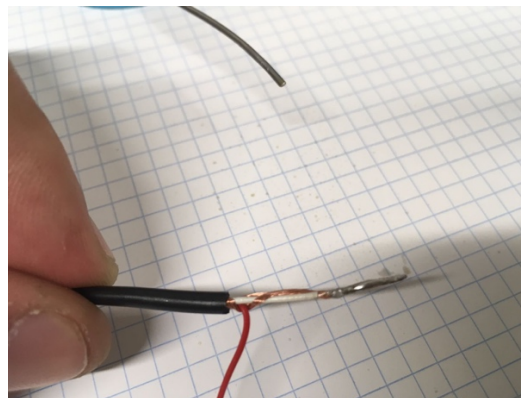
**Figura 3.69.** Pasta de soldadura.



**Figura 3.70.** Material de unión para soldadura.



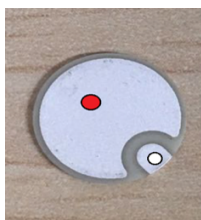
**Figura 3.71.** Soldadura en los cables.



**Figura 3.72.** Soldadura realizada.

Una vez soldados los dos cables se realiza el mismo procedimiento con el rojo. Al no tener otro cable con el que soldar el rojo simplemente se le añade estaño para que tenga material de unión al soldarlo al PZT.

4.2 Una vez los cables están preparados debemos soldarlos al PZT. El PZT usado tiene dos zonas polarizadas: En la zona roja se tiene que conectar el cable rojo mientras que en la zona blanca el cable blanco junto al que viene sin aislante.



**Figura 3.73.** Esquema conexión en PZT.

Al soldar los cables hay que ir con cuidado de que no se toquen entre ellos, que estén dentro de su zona de conexión (no sobrepasar la zona blanca del PZT) y que no tengan contacto con la estructura cilíndrica. Al ya tener los cables con estaño no es necesario añadir, solo tenemos que calentar el material con el soldador y pegarlo en el PZT según el esquema anterior.



**Figura 3.74.** Conexión de cables a PZT.

Una vez ya se tiene el PZT instalado en la estructura el procedimiento es el mismo para los siguientes PZTs superficiales a instalar. En éste experimento se han instalado cuatro piezoelectricos de superficie. Dos opuestos entre ellos a cada extremo de la estructura.

Al tener los piezoelectricos de superficie pegados se debe proceder al pegado de los piezoelectricos entre estructuras. Éstos piezoelectricos sirven para medir diferencias de presión entre dos estructuras juntas (la unión). Para realizar la instalación se debe seguir los siguientes pasos:

1. Al igual que en piezoelectricos de superficie el primer paso es marcar la zona de posicionamiento del PZT y limpiarla mediante los mismos equipos explicados anteriormente. En este caso se deben instalar cuatro sensores posicionados entre los agujeros del extremo de la estructura y sobresaliendo lo mínimo posible para poder realizar los conexiones.



**Figura 3.75.** Zona instalación PZT limpia de impurezas.

2. Al tener la zona de posición del PZT libre de suciedad se procede a la conexión del cableado del sensor. La conexión se realiza antes del pegado ya que facilita el trabajo debido a la posición en que estarán los sensores una vez pegados. Para realizar la conexión se debe tener en cuenta que este tipo de sensor tiene las dos caras polarizadas. Es decir, hay que conectar el cable rojo en una cara del piezoeléctrico y el cable blanco junto al que vienen sin aislante en la otra cara del sensor. El sensor tiene una cara marcada con un “+” y, para tener los cuatro PZT conectados de la misma manera se decide que en la cara con el “+” marcado se conectará el cable blanco junto al que viene sin aislante. Recordar que el procedimiento de soldadura de los cables es el mismo que en los sensores de superficie. Al soldar los cables hay que hacerlo lo más pegados al extremo del sensor y opuestos para ocupar el mínimo espacio.



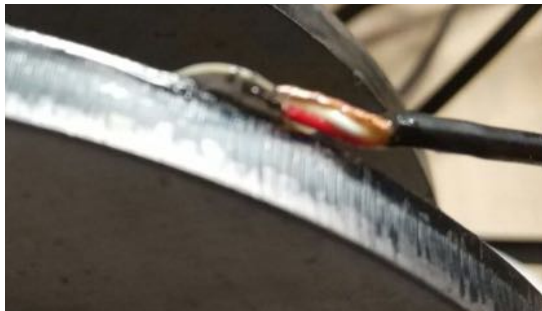
**Figura 3.76.** Cables soldados en PZT entre estructuras.

3. Al tener los cables soldados al sensor se procede al pegado en la estructura. Para pegarlos se hace igual que los de superficie con el mismo pegamento y el mismo imán. La única diferencia es la posición en que deben pegarse. Al igual que se ha hecho con la conexión de los cables de situarlos todos igual teniendo como referencia la cara con el “+”, se decide que la cara a poner en contacto directo con el pegamento sea la que no tiene el “+”. No se tiene que pegar todo el sensor en el extremo limpio de la estructura, sino que se debe pegar de

manera que la zona del sensor donde están los cables soldados queden fuera de la estructura y que no toquen a ésta. Esto se hace para tener los cables fuera de la estructura al juntar dos estructuras y evitar la rotura de los cables y su contacto con ésta. Al conectar estos sensores hay que tener en cuenta que se tratan de elementos muy pequeños y muy frágiles. Al realizar el pegado se debe dejar el cable soldado apoyado para que el sensor no tenga que soportar su peso ya que este pequeño peso es capaz de partir los sensores



**Figura 3.77.** Pegado y posicionado del sensor junto al imán.



**Figura 3.78.** Detalle posicionado sensor.

4. Una vez el pegamento está seco se puede retirar el imán y ya se tiene el sensor pegado y conectado para ser usado. Para la instalación de los tres restantes se debe realizar de la misma forma que el explicado anteriormente.

### 3.2.4. Conexionado general

Al realizar el conexionado del banco experimental se debe tener en cuenta que hay que amplificar la señal de salida del PicoScope 5000 ya que ésta sale con un máximo de 2V y no es suficiente para excitar la estructura a estudiar. Para ello se debe enviar la señal de salida del PicoScope 5000 al amplificador *TS250-1*. Con esto se consigue amplificar la señal de 2V de amplitud máxima a 20V que es el máximo que se puede amplificar con el *TS250-1*, y además puede proveer al circuito de corrientes de hasta 6Amperios, lo cual es muy importante en una instalación de estas características.

Una vez amplificada la señal de salida (la que servirá como señal de excitación del actuador), se realiza el circuito para transferir la señal al actuador de la estructura. Para hacerlo se usa un circuito RL (circuito que contiene una resistencia ( $R$ ) y una bobina ( $L$ ) en serie). Se escoge este circuito ya que se trata del circuito más simple posible usando la bobina instalada en el actuador magnetostrictivo y una resistencia de gran capacidad para soportar los valores de voltaje e intensidad del circuito.

La resistencia escogida es la *HSC100 1R0 J* ya que se trata de una resistencia  $1\Omega$  que soporta grandes voltajes (hasta 1900V) y potencias de hasta 100W [14].

Para realizar el conexionado se usa la protoboard para conectar todos los elementos mencionados anteriormente y tener espacio para poder conectar las entradas/canales del PicoScope 5000 y poder así analizar los datos obtenidos en sensores y actuadores mediante el ordenador.

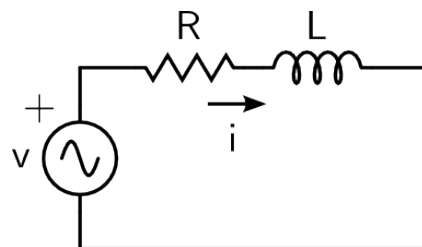


Figura 3.79. Esquema circuito RL.

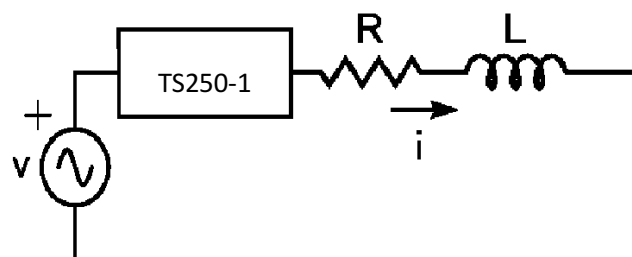


Figura 3.80. Esquema circuito utilizado para el banco experimental.



### 3.3. Generación de la señal de excitación

#### Señal utilizada

Para la creación de la señal se tiene que tener en cuenta que se buscan excitar ciertos modos de frecuencia de la estructura a estudiar para poder recibir información útil en los receptores. Para crear la señal de excitación a generar se observan diferentes problemas:

- Si se usa una señal senoidal con la frecuencia deseada pero de forma continua se tiene el problema de no saber dónde parar la señal ni cuántos ciclos la debemos dejar ejecutándose.
- Si se usa la señal senoidal con la frecuencia deseada pero con solo tres o cinco ciclos se presenta el problema de que se crea un transitorio que en respuesta en frecuencia no es recomendable. Al tener un transitorio, éste se termina excitando a la frecuencia deseada pero también se excita con muchas otras frecuencias no deseadas pudiendo modificar la señal de excitación y dando muchos problemas en la experimentación.

En vista de éstos problemas y una vez analizados se llega a la conclusión que la mejor opción para evitar estos problemas es la siguiente:

- Usar una señal de tres a cinco ciclos pero aumentando y disminuyendo su amplitud lentamente. Así no hay saltos abruptos y se excita con la frecuencia deseada y a frecuencias solo un poco mayor y un poco menor de ésta. Por tanto, la señal de excitación que mejor se adapta a lo comentado anteriormente es la señal Hanning.

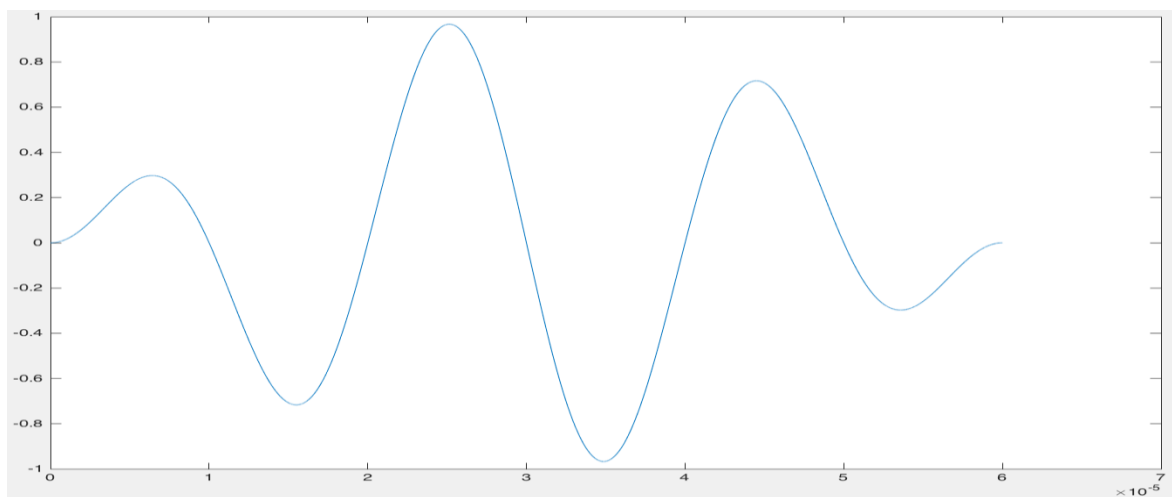


Figura 3.81. Señal Hanning utilizada modelada en Matlab.

## Modelado de la señal

Para realizar la señal Hanning a utilizar en el software el PicoScope 5000 Series, necesitamos un documento “\*.csv”. Para ello hay que construir la señal mediante el programa *Matlab* para luego importarla al formato requerido.

El código utilizado en *Matlab* para la realización de la señal graficada anteriormente (Figura 3.81) es el siguiente:

```
clear;clc;close all %Sirve para reiniciar todas las variables y cerrar todos los archivos de Matlab
%Señal de excitación
f=50000; %f es la variable donde se almacena la frecuencia (se elige 50KHZ)
n=3; % n es la variable que almacena el número de ciclos de la señal
Tt=1/f;
%t=0:0.0000001:n*Tt;
t=linspace(0,n*Tt,16384);
m=0.7;%m es la variable donde se almacena la delta T
v=sin(f/n*pi*t).*sin(2*f*pi*t); %con esta función se construye la señal Hanning
plot(t,v) %en este punto se dibuja la señal para poder comprobar que no hemos hecho ningún
error en el proceso de programación
```

Una vez se tiene el programa hecho se debe guardar en formato “\*.csv” y de manera que el software del PicoScope 5000 Series sea capaz de reconocerlo. Para ello se deben realizar dos pasos intermedios:

- Guardar el documento *Matlab* en formato “\*.csv”.
- Una vez se tiene el documento hay que escribir en *Matlab* la siguiente línea de código:

```
dlmwrite('Hanning_3p_50KHz.csv',v,'delimiter','\n')
```

Donde *Hanning\_3p\_50KHz.csv* es el nombre que se le ha dado al fichero y las otras funciones sirven para colocar los valores del “\*.csv” de forma que el software los pueda leer correctamente.

En éste punto ya se tiene el archivo de la señal de excitación preparada para cargarla en el software y utilizarla.



### **3.4. Obtención de datos**

Una vez se tienen los sensores/actuadores posicionados en la estructura a estudiar y el circuito/conexionado realizado y preparado hay que saber cómo obtener los datos.

Para la obtención de los datos se usará el Software del PicoScope 5000 y, mediante las cuatro entradas disponibles que tiene (A, B, C y D) se recogerán los datos deseados.

Para obtener datos hay que conectar los canales con los captadores de señal que tiene el PicoScope 5000. Una vez se conecta el canal al elemento captador de señal se debe conectar el elemento captador a los cables que se quieran medir. Por ejemplo, si se quiere ver la señal recibida en un sensor PZT se deben conectar los cables soldados al sensor junto al elemento conectado al canal del PicoScope que queramos. Una vez conectado sensor con canal de entrada de información ya se puede activar el canal en el Software y allí obtener los datos (de manera visual mediante la gráfica). Para conectar el canal al Software y saber cómo usarlo referirse al apartado 3.1.1 donde se explica el funcionamiento del Software del PicoScope 5000 paso a paso.

Una vez se observan los datos deseados captados por el PicoScope (un máximo de cuatro al tener cuatro entradas en el PicoScope) hay que proceder a descargar los datos en formato imagen (para visualizar las gráficas tal y como se observan en el Software) o en formato numérico (para realizar estudios estadísticos o de análisis en el caso que se quieran estudiar defectos). En el caso de éste proyecto solo nos interesan los datos en formato imagen/gráfica ya que no se procede al estudio de defectos.

Una vez realizada la captación de datos (ver apartado 3.1.1) se procede a descargar los datos obtenidos mediante el Software. Para ello hay que guardar los datos obtenido con la opción “Guardar como...” y, una vez allí se escoge el formato de los datos. Al necesitar solo las gráficas en formato imagen se guardan los datos en formato “.png” pero, si quisiéramos los datos numéricos para realizar su estudio de forma minuciosa (buscar defectos) se pueden guardar los datos en formato texto “.txt” entre otros.

## 4. Experimentación

### 4.1. Experimentación realizada

Para estudiar el funcionamiento del banco experimental diseñado se realiza un testeo de los sensores y actuadores. Para ello se realizan varios experimentos enviando la señal de excitación a través de los dos actuadores magnetostrictivos para poder observar la señal recibida en los sensores. Al tratarse de la realización del banco experimental no se estudian los defectos, simplemente el funcionamiento de los sensores y actuadores.

Para la realización de los experimentos se han numerado los actuadores/sensores magnetostrictivos y los piezoeléctricos para la fácil identificación de éstos.

<b>Actuador/sensor</b>	<b>Nomenclatura utilizada para su identificación</b>
<b>Actuador/sensor magnetostrictivo superior. El que tiene un bobinado con muchas vueltas.</b>	M1
<b>Actuador/sensor magnetostrictivo medio. El que tiene un bobinado preciso y con pocas vueltas.</b>	M2
<b>Sensor magnetostrictivo inferior. El que funciona con ondas longitudinales, no torsionales.</b>	M3
<b>Piezoeléctrico situado entre los dos tubos.</b>	S1
<b>Piezoeléctrico superior del tubo inferior.</b>	S2
<b>Piezoeléctrico inferior del tubo inferior.</b>	S3

**Tabla 8.** Nomenclatura utilizada en actuadores/sensores.

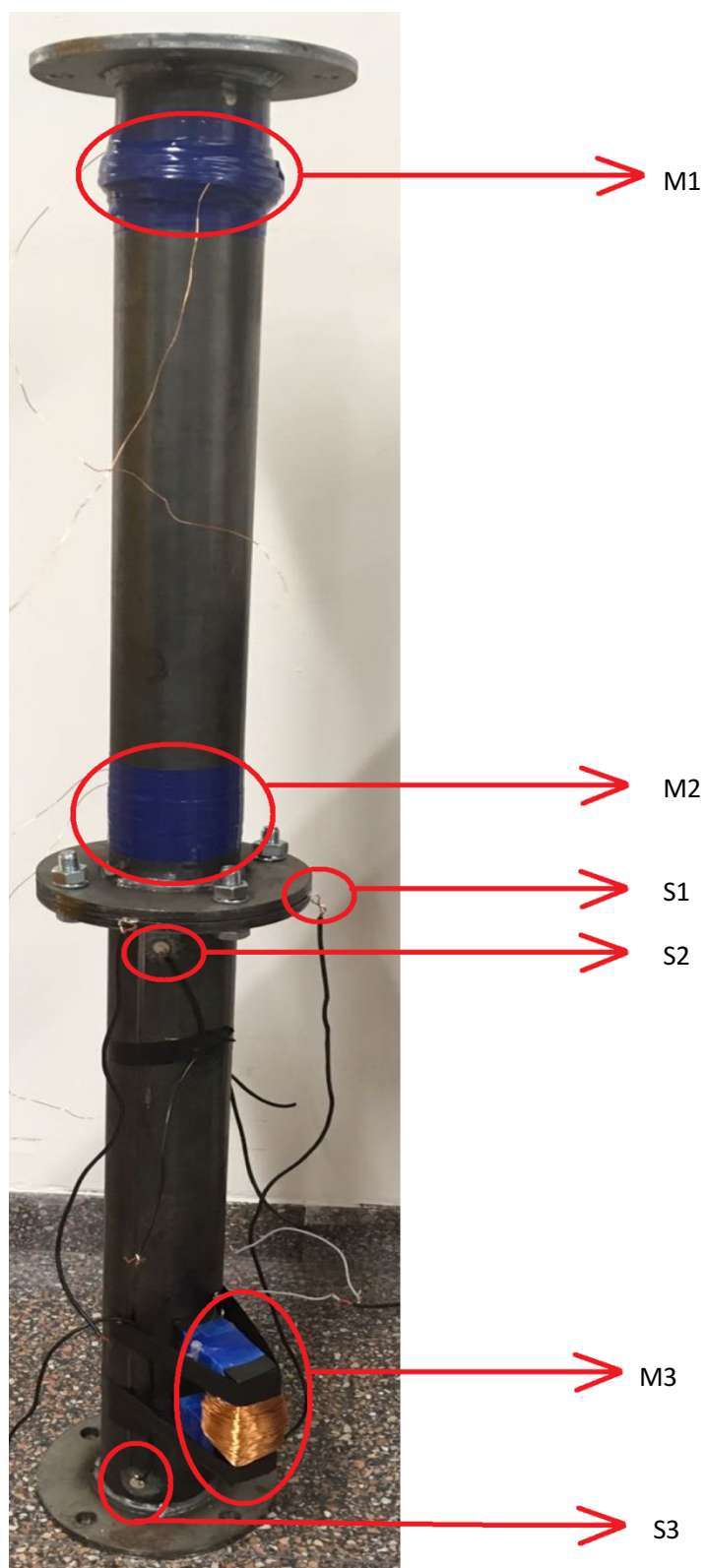


Imagen 4.1. Posición sensores/actuadores en estructura.

Para la realización de los experimentos se han usado como actuadores los dos magnetostrictivos de onda torsional (M1 y M2) para así comparar los dos tipos de bobinado. Para organizar la experimentación se ha usado la siguiente tabla para así estudiar todas las combinaciones posibles:

Actuador	Canal A	Canal B	Canal C	Canal D
<b>M1</b>	Excitación que llega al actuador	M2	M3	-----
<b>M1</b>	Excitación que llega al actuador	S1	S2	S3
<b>M2</b>	Excitación que llega al actuador	M1	M3	-----
<b>M2</b>	Excitación que llega al actuador	S1	S2	S3

**Tabla 9.** Experimentos realizados.

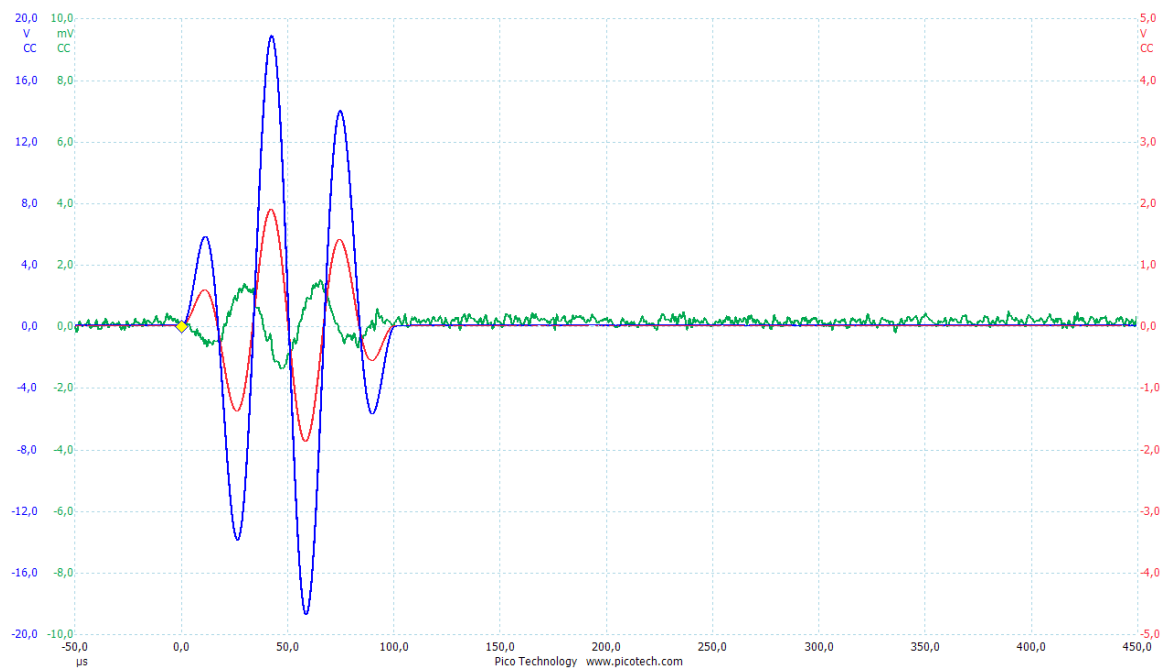
## 4.2. Ejemplo de señales capturadas

Para poder entender las gráficas se necesita saber el color de cada canal (para saber qué es qué). Para ello hay que mirar la guía del usuario del PicoScope 5000 ( ver figura 3.5) donde se pueden ver los colores:

Canal entrada PicoScope 5000	Color de la señal
<b>Canal A</b>	Azul
<b>Canal B</b>	Rojo
<b>Canal C</b>	Verde
<b>Canal D</b>	Amarillo

**Tabla 10.** Colores de los canales del PicoScope 5000.

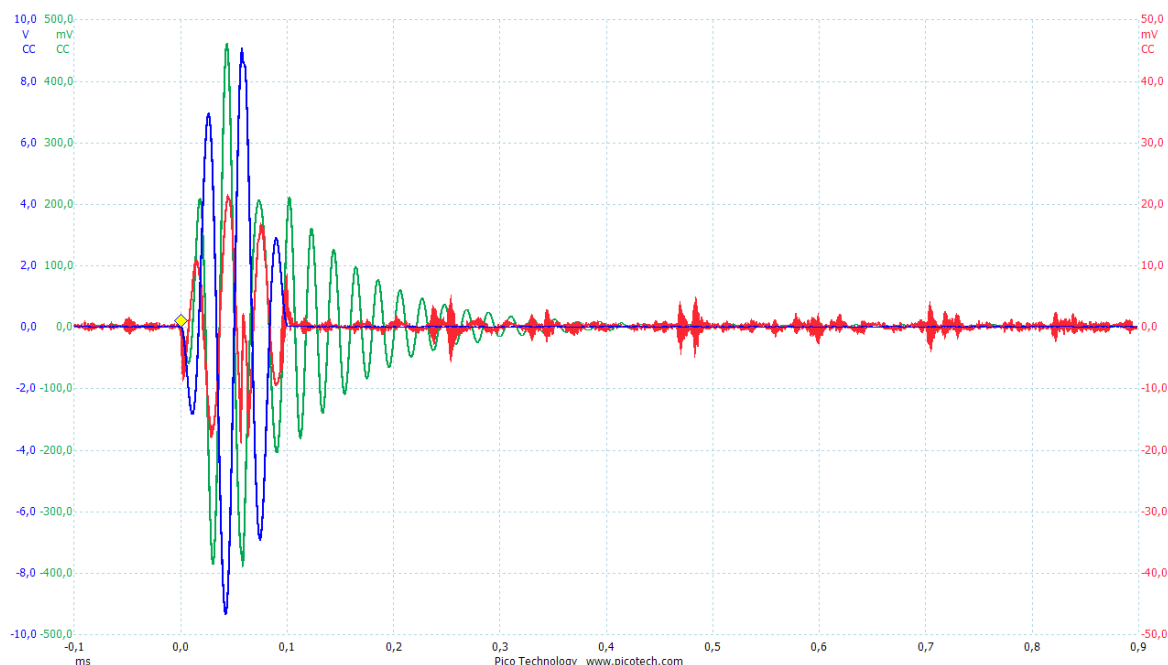
Una vez se saben los colores de cada canal para su interpretación correcta, hay que estudiar que pasa en el circuito desde que sale la señal de excitación del PicoScope 5000 hasta que llega la señal al actuador. Para ello se usan tres canales del PicoScope 5000: Canal A, canal B y canal C. En el canal A se observa la señal una vez se ha amplificado y ha pasado por la resistencia, es decir, la señal que llegará al actuador en la estructura. En el canal B se observa la señal de salida del PicoScope 5000 (conectando la salida del PicoScope 5000 a la entrada del canal A). Por finalizar, en el canal C se observa la intensidad del amplificador, ya que tiene una salida para poder estudiarlo. En esta salida se observa que 100mV equivalen a 1A.



**Imagen 4.2.** Estudio circuito RL.

#### 4.2.1. Señales capturadas usando como actuador M1

1. En la primera experimentación se pueden observar los datos obtenidos en M2 (rojo) y M3 (verde) respondiendo al impulso enviado a M1 (azul).



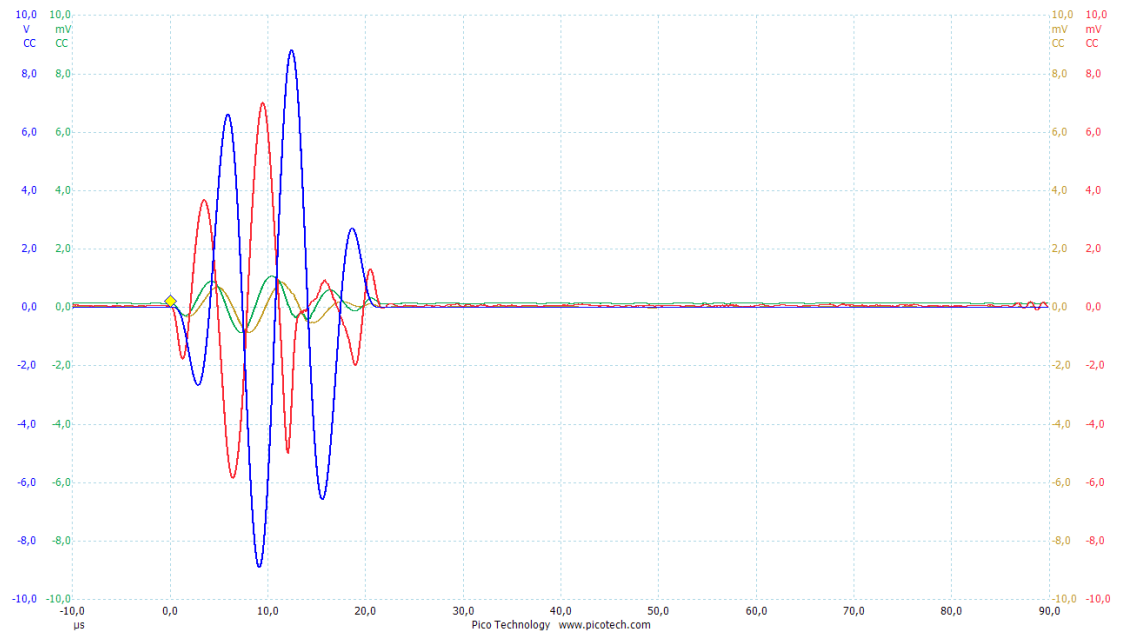
**Imagen 4.3.** Señales obtenidas con sensores magnetostrictivos excitando M1.

Al estudiar las señales recibidas se pueden apreciar dos comportamientos completamente distintos entre los dos sensores magnetostrictivos M2 y M3. Esta diferencia de comportamiento se debe a que el sensor M2 es torsional (al igual que el M1 desde donde se excita la estructura) mientras que el sensor M3 es lineal. Debido a esta diferencia en la recepción y envío de señales los comportamientos son totalmente distintos.

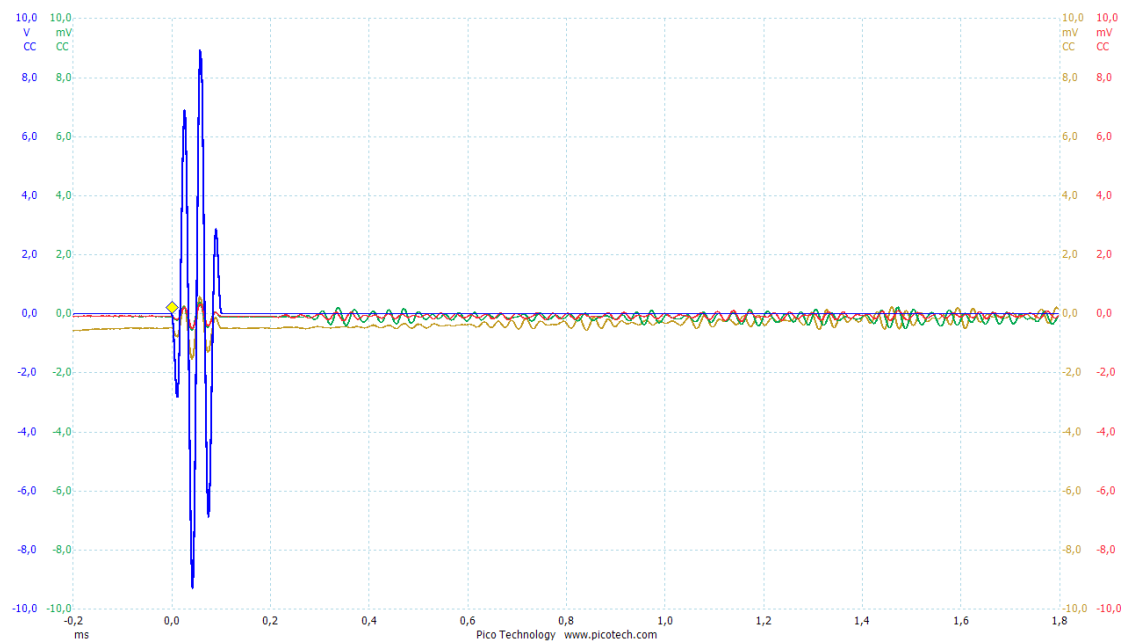
En relación al comportamiento del sensor M2, éste recibe la señal muy débil (de 10V que se envía a la estructura a 20mV que lo recibe). Además de esta pérdida de potencia en la señal se puede apreciar que responde al estímulo de forma inmediata y, una vez recibido y transcurrido un tiempo, vuelve a recibir señales mucho más débiles debido a los rebotes en la estructura de la señal de excitación.

En relación al sensor M3, pese a estar más alejado de M1 que M2 (el doble de distancia), recibe una señal más fuerte, con una amplitud de unos 450mV. En el caso del tipo de señal recibida, se puede observar que recibe una señal de forma lineal que disminuye de forma constante hasta llegar a valor cero una vez ya ha recogido los rebotes más potentes.

2. En la segunda experimentación se pueden observar los datos obtenidos en S1 (rojo), S2 (verde) y S3 (amarillo) respondiendo al impulso enviado a M1 (azul).



**Imagen 4.4.** Señales obtenidas con sensores PZTs excitando M1.



**Imagen 4.5.** Señales obtenidas con sensores PZTs excitando M1.

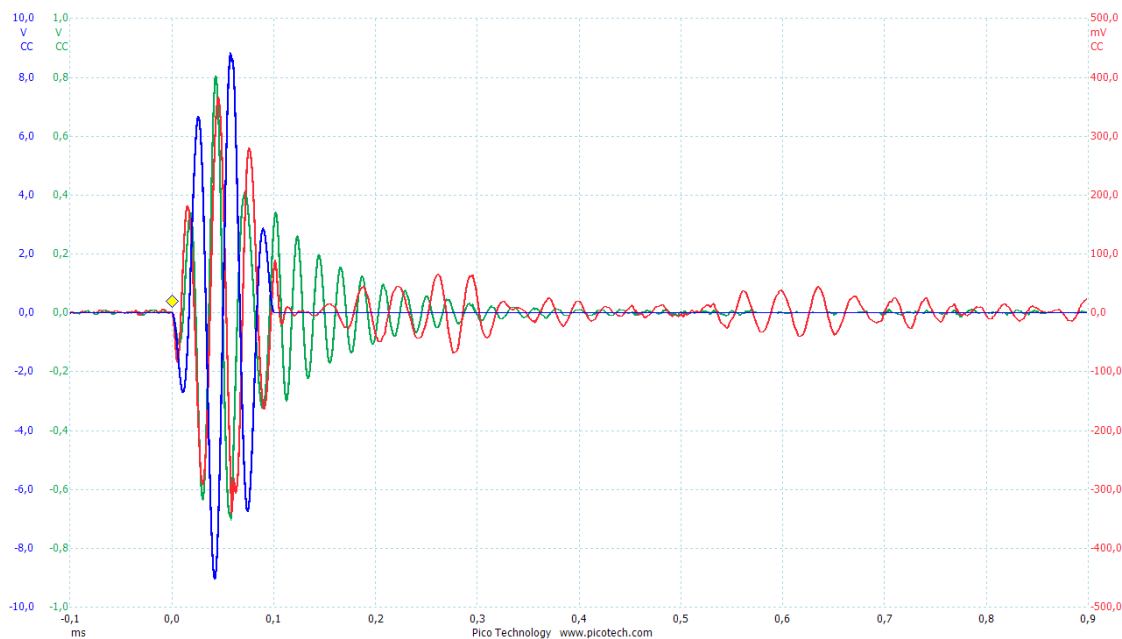
En esta experimentación se pueden visualizar dos estados en la respuesta de los piezoeléctricos. En el momento de excitación del actuador M1 los piezoeléctricos responden de forma instantánea para, una vez enviada la señal de excitación, estar un tiempo en volver a recibir. Esto

se debe a que el momento de excitación toda la estructura se ve afectada enviando señal a todos los sensores. En éste momento se puede observar que el sensor S2 y S3 se comportan de manera similar mientras que el sensor S1 presenta mucha más amplitud. Esto es debido a su posición, ya que al estar entre las dos estructuras es más sensible.

Una vez la señal se transmite por la estructura los sensores piezoeléctricos reciben la señal de una forma muy semejante ya que presentan misma amplitud (del orden de 0,25mV). Esta respuesta se mantienen en el tiempo de forma constante.

#### 4.2.2. Señales capturadas usando como actuador M2

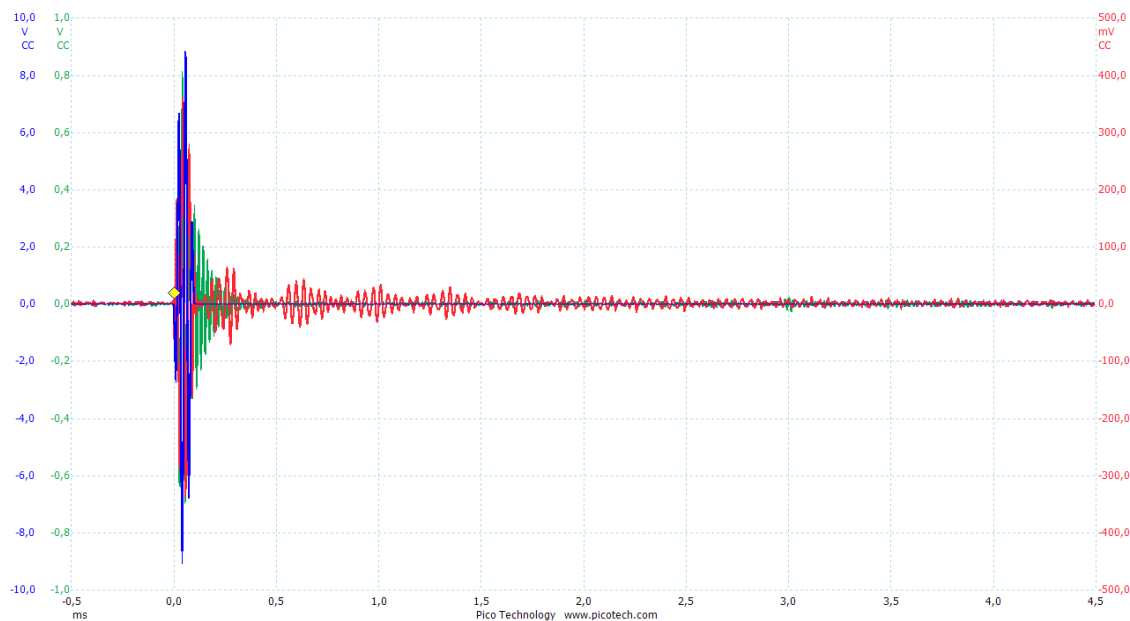
1. En la primera experimentación se pueden observar los datos obtenidos en M1 (rojo) y M3 (verde) respondiendo al impulso enviado a M2 (azul).



**Imagen 4.6.** Señales obtenidas con sensores magnetostrictivos excitando M2.

En esta experimentación se pueden observar semejanzas con respecto a la excitación de M1 estudiando la respuesta en M2 y M3 (ver imagen 4.5). Las diferencias de excitar M2 respecto a la excitación con M1 es la amplitud de la señal. Se puede observar que en este caso las señales tienen una mayor amplitud y, por tanto, la señal de excitación se envía por la estructura mucho mejor. En el sensor M1 la señal alcanza una amplitud máxima de unos 350mV mientras que el sensor M2 alcanza una amplitud máxima de unos 400mV. El cambio en el recibimiento de la señal se ve mejorado sobretodo en el sensor M1.





**Imagen 4.7.** Señales obtenidas con sensores magnetostrictivos excitando M2.

En esta imagen se puede observar claramente como el sensor M1 responde a la señal de excitación. Éstos disminuyen según pasa el tiempo debido a los rebotes en la estructura de la señal haciendo disminuir su intensidad hasta desaparecer.

2. En la segunda experimentación se pueden observar los datos obtenidos en S1 (rojo), S2 (verde) y S3 (amarillo) respondiendo al impulso enviado a M2 (azul).



**Imagen 4.8.** Señales obtenidas con sensores PZTs excitando M2.

En esta experimentación se puede observar que las semejanzas entre la excitación de M2 y M1 son muy similares. Tal y como ha pasado al usar como sensores los magnetostrictivos, los piezoeléctricos excitados mediante M2 reciben la señal con más potencia y de manera más eficaz con respecto a lo obtenido usando M1 como excitador y los resultados obtenidos (a diferencia de la amplitud) son casi iguales.

### 4.3. Resultados

Para la obtención de resultados lo que se ha hecho es montar dos actuadores/sensores magnetostrictivos para onda torsional de forma diferente para poder comparar su funcionamiento y la calidad de la señal enviada a los diferentes sensores de la estructura. Para poder realizar la comparación de forma adecuada se ha utilizado como actuador el magnetostrictivo M1 y el M2. Para el estudio se han observado las señales captadas por los otros dos magnetostrictivos que no se usaban como actuadores (uno de ellos con diferente configuración, para ondas longitudinales) y las señales captadas por tres piezoeléctricos. Los piezoeléctricos seleccionados son uno de cada zona donde se han colocado éstos. Se usa un piezoeléctrico que está posicionado entre las dos tuberías unidas mediante los cuatro tornillos (S1), otro piezoeléctrico posicionado a la cara externa de la tubería en la parte superior de la tubería inferior (S2) y un piezoeléctrico posicionada a la cara externa de la tubería en la parte inferior de la tubería inferior (S3). Gracias a esta combinación de sensores se puede estudiar la señal recibida en un sensor magnetostrictivo torsional y uno lineal y comparar la señal entre piezoeléctricos según su distancia al actuador.

Una vez se han realizado todos los experimentos posibles se han encontrado diferencias notables en la calidad de las señales obtenidas por los sensores según el uso de M1 o M2 como actuador. Estas diferencias se deben a que los dos magnetostrictivos M1 y M2 se han instalado de forma distinta: El M1 se ha instalado de manera que su bobinado se basa en la realización de muchas vueltas sin ordenarlas ni ponerlas de manera precisa mientras que el M2 se ha instalado de manera que su bobinado tiene solamente una capa pero realizada de forma detallada y precisa (ver figura 3.35 y 3.36).

Una vez realizados los experimentos y sabiendo las diferencias entre M1 y M2 (a parte de la distancia entre sensores) hay que comparar los resultados obtenidos en los diferentes sensores piezoeléctricos y magnetostrictivos teniendo en cuenta que se ha usado siempre la misma señal de excitación. Al estudiar y comparar las señales obtenidas se ha llegado a las conclusiones siguientes:

- Al usar el actuador M1 la señal llega a los sensores con una amplitud muy débil, dificultando en el caso de los piezoeléctricos su estudio ya que no se puede ampliar a más de 10mV la escala de amplitud en la gráfica para poder mejorar la visualización.
- Al usar el actuador M2 la señal llega a los diferentes sensores de la misma forma y condiciones que en los experimentos realizados con M1 pero de forma mucho más fuerte y clara. Al llegar la onda mejor, el estudio de los sensores se hace mucho más fácil además de asegurar una mejor calidad de la señal y así disminuir notablemente el error producido al estudiar la señal.

Al observar como envían la señal los dos magnetostrictivos según el bobinado que tengan se puede concluir que el mejor bobinado para la excitación de la estructura es el realizado en el magnetostrictivo M2 ya que mejora la señal de manera que los sensores utilizados reciben el doble de amplitud que en M2 en el caso del magnetostrictivo lineal (M3) y cinco veces más que en M2 en el caso de los piezoeléctricos (S1, S2 y S3).

## **5. Análisis del impacto ambiental**

En relación al impacto ambiental, el proyecto realizado pretende agilizar el estudio de estructuras, mayoritariamente estructuras cilíndricas, para la detección de defectos difíciles de identificar. Al realizar este estudio se consigue verificar el estado de la estructura para asegurar que no aparezcan grietas o agujeros hasta el punto de poder verter el líquido que fluye en su interior en el ambiente. El estudio de las estructuras se daría principalmente en tuberías que transportan líquidos y gases perjudiciales para el medio ambiente como puede ser petróleo en bruto y/o gas natural. Al realizar los estudios de la estructura usando el banco experimental explicado se asegura la estructura y se pueden prever posibles fallos antes de que éstos ocurran y así evitar catástrofes en la zona.

Con el banco experimental se puede prevenir el mal estado de una tubería y evitar así su repentino colapso vertiendo materiales en el suelo perjudiciales para la flora y fauna de la zona. Por tanto, gracias al banco experimental realizado se pueden evitar catástrofes como los comentados anteriormente, lo cual ayuda a prevenir impactos negativos en el medio ambiente causados por el ser humano.

## Conclusiones

El objetivo de este proyecto ha sido crear un banco experimental para la detección de defectos físicos en estructuras cilíndricas. Esto aumentará la rapidez en la que se detectan los defectos no visibles y, por tanto, aumentará la seguridad de las estructuras. Por esta razón los resultados obtenidos en este trabajo serán útiles para el estudio de los defectos presentes en las estructuras cilíndricas. Gracias al estudio que se podrá realizar, se pretende prevenir catástrofes por colapsos de estructuras y concienciar al lector de la importancia de revisar las estructuras en busca de posibles fallos.

De la realización del banco experimental se pueden sacar varias conclusiones una vez realizado el montaje y la experimentación del mismo.

Con la configuración del sensor/actuador magnetostrictivo seleccionado (el realizado mediante un bobinado con pocas vueltas y una sola capa bien ordenada) se puede observar que reciben mejor las señales de la estructura los sensores magnetostrictivos que los PZTs ya que presentan unas amplitudes de voltaje muy superiores. Por tanto, al realizar el estudio de una estructura de grandes dimensiones (tanto en diámetro como en longitud) se preferirá el uso de sensores y actuadores magnetostrictivos ya que recogen señales con mayor facilidad y potencia que los PZTs pudiendo así estudiar estructuras de grandes dimensiones con el uso de pocos sensores magnetostrictivos.

En relación al montaje, los actuadores/sensores magnetostrictivos, además de ser mejores en la captación de señales, son más fáciles y rápidos de montar que los PZTs ya que, como se ha observado en el montaje, el montaje de los PZTs es mucho más complicado al tratarse de sensores muy sensibles que se rompen con mucha facilidad obligando a repetir todo el proceso desde cero mientras que en los magnetostrictivos su montaje es mucho más fácil al no tener que ir con tanto cuidado ya que no se rompen con facilidad. Por tanto, en relación a facilidad de montaje también se prefiere el uso de los actuadores/sensores magnetostrictivos.

También se puede observar que la posición de la estructura puede afectar a los sensores ya que si la estructura está posicionada cerca que cableado y equipos eléctricos los sensores se ven influenciados y dan valores erróneos. Con la experimentación se ha comprobado que afecta bastante al recoger datos y, por tanto, se tiene que tener en cuenta posicionar la estructura a una distancia prudencial de estos equipos y cableados al realizar la experimentación.

## Presupuesto y/o Análisis Económica

### 1. Material

	Coste por unidad	Cantidad	Coste total
<b>PZT PRYY+0110</b>	7 €/unidad	8 unidades	56,00 €
<b>Material magnetostrictivo</b>	125 €/metro	2 metros	250,00 €
<b>Imán</b>	5 €/unidad	1 unidad	5,00 €
<b>Alambre de cobre</b>	6,40 €/15metro	15 metros	6,40 €
<b>Adhesivo Araldite</b>	10,95 €/unidad	1 unidad	10,95 €
<b>Resistencia</b>	2,17 €/unidad	1 unidad	2,17 €
<b>Papel de lija</b>	3,46 €/unidad	1 unidad	3,46 €
<b>Cabezales para pulido</b>	5,70 €/unidad	1 unidad	5,70 €
<b>Cables</b>	7,99 €/25metros	25 metros	7,99 €
<b>Acetona</b>	2,20 €/unidad	1 unidad	2,20 €
<b>Pasta de soldadura</b>	2,66 €/unidad	1 unidad	2,66 €
<b>Unión para soldadura (estaño)</b>	3,25€/unidad	1 unidad	3,25 €

**Tabla 11.** Coste de material.

## 2. Equipos y herramientas

	Coste por unidad	Cantidad	Coste total
<b>Amplificador de corriente (TS250)</b>	1250 €/unidad	1 unidad	1250,00 €
<b>Soldador (NTSS4N)</b>	27 €/unidad	1 unidad	27,00 €
<b>PicoScope 5000</b>	2600 €/unidad	1 unidad	2.600,00 €
<b>Ordenador (Dell Latitude E6530)</b>	550 €/unidad	1 unidad	550,00 €
<b>Protoboard</b>	12,95 €/unidad	1 unidad	12,95 €
<b>Taladro</b>	65 €/unidad	1 unidad	65,00 €
<b>Software Matlab</b>	800 €/año	1 unidad	800,00 €

Tabla 12. Coste de equipos y herramientas.

## 3. Equipo de protección personal

	Coste por unidad	Cantidad	Coste total
<b>Guantes de látex</b>	4,35 €/caja	1 caja	4,35 €

Tabla 13. Coste equipo de protección personal.

## 4. Costes de investigación

	Coste por unidad	Cantidad	Coste total
<b>Josep Corrales (Ingeniero)</b>	15 €/hora	630 h	9.450,00 €
<b>Luis Mujica (Director)</b>	20 €/hora	120 h	2.400,00 €
<b>Magda Ruiz (Co-Director)</b>	20 €/hora	40 h	800,00 €
<b>Jabid Quiroga (Profesor de ayuda)</b>	20 €/hora	20 h	400,00 €
<b>Leonardo Acho (Profesor de ayuda)</b>	20 €/hora	20 h	400,00 €

Tabla 14. Costes de investigación.



5. Coste total

	<b>Coste total</b>
<b>Material</b>	355,78 €
<b>Equipos y herramientas</b>	5.304,95 €
<b>Equipo de protección personal</b>	4,35 €
<b>Costes de investigación</b>	13.450,00 €
<b>TOTAL</b>	<b>19.115,08 €</b>

**Tabla 15.** Coste total.



## Lista de Tablas

Tabla 1: Deformación máxima e inducción de saturación de diferentes materiales.....	19
Tabla 2: Coeficiente de magnetostricción de los materiales magnetostrictivos más utilizados.....	19
Tabla 3: Ambiente adecuado.....	23
Tabla 4: Requisitos mínimos del sistema.....	24
Tabla 5: Especificaciones 7602M.....	43
Tabla 6: Especificaciones TS250-1.....	44
Tabla 7: Características PRYY+0110.....	47
Tabla 8: Nomenclatura utilizada en actuadores/sensores.....	68
Tabla 9: Experimentos realizados.....	70
Tabla 10: Colores de los canales del PicoScope 5000.....	70
Tabla 11: Coste de material.....	81
Tabla 12: Coste de equipos y herramientas.....	82
Tabla 13: Coste equipo de protección personal.....	82
Tabla 14: Costes de investigación.....	82
Tabla 15: Coste total.....	83

## Lista de figuras

Figura 1.1: Sistema para detección de defectos basándose en vibraciones.....	9
Figura 1.2: Técnica de sensado para estructuras utilizando piezoeléctricos.....	10
Figura 1.3: Configuración para la monitorización en estructuras cilíndricas utilizando PZT's.....	11
Figura 2.1: Descripción esquemática del efecto Joule (a) y el efecto Villari (b).....	16
Figura 2.2: Curva de histéresis para la magnetización.....	18
Figura 2.3: Representación onda torisional.....	20
Figura 2.4: Representación onda longitudinal.....	21
Figura 2.5: Representación onda transversal.....	21
Figura 3.1: Conexión máximo 2 salidas.....	23
Figura 3.2: Conexión mínimo 3 salidas.....	23
Figura 3.3: Diagrama de conexión.....	24
Figura 3.4: PicoScope 5000 Series.....	25
Figura 3.5: Software PicoScope 5000 paso 1.....	26
Figura 3.6: Software PicoScope 5000 paso 2.....	26
Figura 3.7: Software PicoScope 5000 paso 3.....	27
Figura 3.8: Software PicoScope 5000 paso 4.....	28
Figura 3.9: Software PicoScope 5000 paso 5.....	29
Figura 3.10: Software PicoScope 5000 paso 6.....	30
Figura 3.11: Software PicoScope 5000 paso 7.....	30
Figura 3.12: Software PicoScope 5000 paso 8.....	31
Figura 3.13: Software PicoScope 5000 paso 9.....	31

Figura 3.14: Software PicoScope 5000 paso 10.....	32
Figura 3.15: Software PicoScope 5000 paso 11.....	32
Figura 3.16: Software PicoScope 5000 paso 12.....	33
Figura 3.17: Software PicoScope 5000 paso 13.....	33
Figura 3.18: Software PicoScope 5000 paso 14.....	34
Figura 3.19: Software PicoScope 5000 paso 15.....	34
Figura 3.20: Software PicoScope 5000 paso 16.....	35
Figura 3.21: Software PicoScope 5000 paso 17.....	35
Figura 3.22: Software PicoScope 5000 paso 18.....	36
Figura 3.23: Software PicoScope 5000 paso 19.....	36
Figura 3.24: Software PicoScope 5000 paso 20.....	37
Figura 3.25: Software PicoScope 5000 paso 21.....	38
Figura 3.26: Software PicoScope 5000 paso 22.....	38
Figura 3.27: Software PicoScope 5000 paso 23.....	39
Figura 3.28: Software PicoScope 5000 paso 24.....	40
Figura 3.29: Software PicoScope 5000 paso 25.....	42
Figura 3.30: Ordenador utilizado.....	42
Figura 3.31: Amplificador 7602M.....	44
Figura 3.32: TS250-1 del laboratorio.....	44
Figura 3.33: Conexionado del TS250-1.....	44
Figura 3.34: Soldador VTSS4N.....	45
Figura 3.35: Soldador VTSS4N.....	45

Figura 3.36: PZT RRY+0110 para capa exterior.....	46
Figura 3.37: PZT RRY+0110 entre estructuras.....	46
Figura 3.38: Material magnetostrictivo.....	48
Figura 3.39: Estructura utilizada.....	49
Figura 3.40: Detalle agujeros extremo del tubo.....	49
Figura 3.41: Línea de corte en material.....	50
Figura 3.42: Corte del material.....	50
Figura 3.43: Corte accidental provocado por el material a 45°.....	50
Figura 3.44: Marcación del material magnetostrictivo en la estructura.....	51
Figura 3.45: Papel de lija.....	51
Figura 3.46: Limpieza de la zona donde se instala el actuador.....	51
Figura 3.47: Superficie limpia de impurezas.....	52
Figura 3.48: Limpieza final con acetona.....	52
Figura 3.49: Cinta utilizada.....	52
Figura 3.50: Pegado del material magnetostrictivo.....	52
Figura 3.51: Lámina pegada en la estructura.....	53
Figura 3.52: Estructura con los dos actuadores instalados.....	53
Figura 3.53: Imán.....	54
Figura 3.54: Magnetización del actuador.....	54
Figura 3.55: Bobinado tipo a.....	54
Figura 3.56: Bobinado tipo b.....	55
Figura 3.57: Detalle bobinado tipo a y tipo b tapados.....	55

Figura 3.58: Alambre de cobre.....	55
Figura 3.59: Punto posición PZT.....	56
Figura 3.60: Taladro utilizado.....	56
Figura 3.61: Accesorios para el taladro.....	56
Figura 3.62: Detalle limpieza superficie.....	57
Figura 3.63: Marcación posición PZT.....	57
Figura 3.64: Araldite Cristal.....	58
Figura 3.65: Aplicación pegamento.....	58
Figura 3.66: Mezcla del pegamento.....	58
Figura 3.67: Posicionado PZT con pegamento.....	59
Figura 3.68: Posicionado imán.....	59
Figura 3.69: Pasta de soldadura.....	60
Figura 3.70: Material de unión para soldadura.....	60
Figura 3.71: Soldadura de los cables.....	60
Figura 3.72: Soldadura realizada.....	60
Figura 3.73: Esquema conexión en PZT.....	60
Figura 3.74: Conexión cables a PZT.....	61
Figura 3.75: Zona instalación PZT limpia de impurezas.....	62
Figura 3.76: Cables soldados en PZT entre estructuras.....	62
Figura 3.77: Pegado y posicionado del sensor junto al imán.....	63
Figura 3.78: Detalle posicionado sensor.....	63
Figura 3.79: Esquema circuito RL.....	64

Figura 3.80: Esquema circuito utilizado para el banco experimental.....	64
Figura 3.81: Señal Hanning utilizada modelada en Matlab.....	65
Figura 4.1: Posición sensores/actuadores en estructura.....	69
Figura 4.2: Estudio circuito RL.....	71
Figura 4.3: Señales obtenidas con sensores magnetostrictivos excitando M1.....	72
Figura 4.4: Señales obtenidas con sensores PZTs excitando M1.....	73
Figura 4.5: Señales obtenidas con sensores PZTs excitando M1.....	73
Figura 4.6: Señales obtenidas con sensores magnetostrictivos excitando M2.....	74
Figura 4.7: Señales obtenidas con sensores magnetostrictivos excitando M2.....	75
Figura 4.8: Señales obtenidas con sensores PZTs excitando M2.....	75



## Bibliografía

- [1] Yoon Yung Kim y Young Eui Kwon. Review of magnetostrictive patch transducers and applications in ultrasonic nondestructive testing of waveguides [en línea]. Seoul: 2015. [Consulta: 12 diciembre 2017]. Disponible a: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041624X15001341>>.
- [2] Ostachowicz, W., Güemes, A. New Trends in Structural Health Monitoring. (2013). Springer-Verlag Wien
- [3] Staszewski, W.J., Boller, C. And Tomlinson, G.R. (2004). Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
- [4] Mujica, L.E.; Rodellar, J.; Vehi, J. A review of impact damage detection in structures using strain data. International journal of COMADEM, 13,3---18. 2008.
- [5] Mujica, L.E.; Rodellar, J.; Fernandez, A.; Güemes, A. Q-statistic and T2-statistic PCA-based measures for damage assessment in structures. Structural health monitoring: an international journal, 10, 539 - 553. 2010
- [6] National Instruments. Understanding FFTs and Windowing [en línea]. [Consulta: 20 diciembre 2017]. Disponible a : <<http://download.ni.com/evaluation/pxi/Understanding%20FFTs%20and%20Windowing.pdf>>.
- [7] R. Grössinger, R. Sato Turtell y N. Mehmood. Materials with high magnetostriction [en línea]. Vienna: 2014. [Consulta: 24 enero 2018]. Disponible a: <<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/60/1/012002/pdf>>.
- [8] Clara Joanna Pacheco. Giant magnetostrictive materials applied to contactless displacement sensors [en línea]. Brazil: 2007. [Consulta: 3 febrero 2018]. Disponible a: <[https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca\\_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=11023@2](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=11023@2)>.
- [9] Christian Albrechts. Magnetostrictive materials [en línea]. Kiel: 2015. [Consulta: 7 febrero 2018]. Disponible a: <<https://www.tf.uni-kiel.de/servicezentrum/neutral/praktika/anleitungen/m205>>.
- [10] Gabrielle Yu. Magnetostriction [en línea]. California: 2016. [Consulta: 7 febrero 2018]. Disponible a: <[https://eng.libretexts.org/Core/Materials\\_Science/Magnetic\\_Properties/Magnetostriction](https://eng.libretexts.org/Core/Materials_Science/Magnetic_Properties/Magnetostriction)>.
- [11] Sergey A. Vinogradov y Jhon Leonard. Development of magnetostrictive sensor technology for guided wave examinations of piping and tubing [en línea]. Texas. [Consulta: 20 abril 2018]. Disponible a: <[http://www.idspektr.ru/10\\_ECNDT/reports/4\\_04\\_10.pdf](http://www.idspektr.ru/10_ECNDT/reports/4_04_10.pdf)>.

- [12] Velleman. VTSS4N [en línea]. 2010. [Consulta: 22 febrero 2018]. Disponible a: <<https://www.esr.co.uk/manuals/167-520.pdf>>.
- [13] Yuri Mnyukh. The True Cause of Magnetostriction [en línea]. Farmington: 2014. [Consulta: 23 febrero 2018]. Disponible a: <<https://arxiv.org/pdf/1103.4527.pdf>>.
- [14] TE Connectivity. Aluminium Housed Power Resisotrs [en línea]. 2011. [Consulta: 15 marzo 2018]. Disponible a: <<http://www.mgelectronic.rs/ProductFilesDownload?Id=2610>>.
- [15] Pico Technology. PicoScope serie 5000 [en línea]. Reino Unido: 2017. [Consulta: 7 marzo 2018]. Disponible a: <<https://www.picotech.com/download/datasheets/picoscope-5000-series-a-b-data-sheet-es.pdf>>.
- [16] Pico Technology, PicoScope 6 Software del osciloscopio para PC Guía del usuario [en línea]. [Consulta: 7 marzo 2018]. Disponible a: <<https://www.picotech.com/download/manuals/PicoScope6SoftwareUsersGuide-es.pdf>>.
- [17] Accel Instruments. TS250 Waveform Amplifier [en línea]. California. [Consulta: 7 marzo 2018]. Disponible a: <<http://www.accelinstruments.com/Products/TS250/Waveform-Amplifier.pdf>>.
- [18] Krhon Hite. Wideband Amplifier Model 7600(M)/7602 (M) [en línea]. [Consulta: 7 marzo 2018]. Disponible a: <<https://www.krohn-hite.com/htm/amps/PDF/7600%20Manual.pdf>>.
- [19] J. M. D. Coey. Magnetism and Magnetic Materials [en línea]. Dublín: 2009. [Consulta: 14 abril 2018]. Disponible a: <<http://www.dsf.unica.it/~fiore/libricorsopt/coef-magnetism.pdf>>.
- [20] Pi Ceramic. Piezoelectric Discs [en línea]. Lederhose: 2018. [Consulta: 25 abril 2018]. Disponible a: <[https://static.piceramic.com/fileadmin/user\\_upload/physik\\_instrumente/files/datasheets/disc-Datasheet.pdf?\\_ga=2.60659053.1154092934.1527087765-1680010503.1527087765](https://static.piceramic.com/fileadmin/user_upload/physik_instrumente/files/datasheets/disc-Datasheet.pdf?_ga=2.60659053.1154092934.1527087765-1680010503.1527087765)>.